

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VAGNER ALEX PESCK

APLICAÇÃO DA VARREDURA *LASER* TERRESTRE EM PLANTIOS
CLONAIIS DE *Eucalyptus* spp PARA DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE
ÁRVORES E ESTUDOS DIAMÉTRICOS

CURITIBA

2015

VAGNER ALEX PESCK

APLICAÇÃO DA VARREDURA *LASER* TERRESTRE EM PLANTIOS
CLONAIIS DE *Eucalyptus* spp PARA DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE
ÁRVORES E ESTUDOS DIAMÉTRICOS.

Tese apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Doutor em Engenharia
Florestal, no Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Florestal, Setor de Ciências
Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Christel Lingnau.

Co-orientador: Prof. Dr. Álvaro Muriel Lima
Machado.

Co-orientador: Prof. Dr. Afonso Figueiredo
Filho.

CURITIBA

2015

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Pesck, Vagner Alex

Aplicação da varredura laser terrestre em plantios clonais de *Eucalyptus spp.* para determinação do número de árvores e estudos diamétricos / Vagner Alex Pesck. – Curitiba, 2015.

89 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Christel Lingnau

Coorientadores: Prof. Dr. Álvaro Muriel Lima Machado

Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 28/05/2015.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Sensoriamento remoto. 2. Eucalipto. 3. Dendrometria. 4. Algoritmos. 5. Teses. I. Lingnau, Christel. II. Machado, Álvaro Muriel Lima. III. Figueiredo Filho, Afonso. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

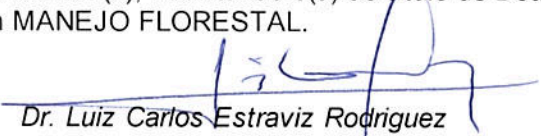
CDD – 621.3678

CDU – 528.8

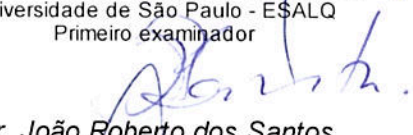
PARECER

Defesa nº. 1120


A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir o(a) doutorando(a) *Vagner Alex Pesck* em relação ao seu trabalho de tese intitulado "**APLICAÇÃO DA VARREDURA LASER TERRESTRE EM PLANTIOS CLONAIIS DE *Eucalyptus* spp. PARA DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE ÁRVORES E ESTUDOS DIAMÉTRICOS**", é de parecer favorável à APROVAÇÃO do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Doutor* em Engenharia Florestal, área de concentração em MANEJO FLORESTAL.



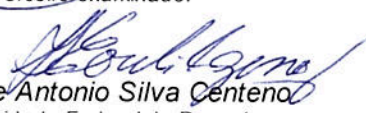
Dr. Luiz Carlos Estraviz Rodriguez
Universidade de São Paulo - ESALQ
Primeiro examinador



Dr. João Roberto dos Santos
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Segundo examinador



Dr. Márcio Coraiola
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Terceiro examinador



Dr. Jorge Antonio Silva Centeno
Universidade Federal do Paraná
Quarto examinador



Dr. Christel Lingnau
Universidade Federal do Paraná
Orientador e presidente da banca examinadora



Curitiba, 28 de maio de 2015.



Antonio Carlos Batista
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

BIOGRAFIA DO AUTOR

VAGNER ALEX PESCK, filho de Arno Christiano Pesck e Maria Anice Scheidt Pesck, nasceu em Imbituva, no estado do Paraná, no dia 17 de fevereiro de 1985.

Iniciou os estudos no Ensino Fundamental em 1996 na Escola Estadual Alcidez Munhoz, concluindo no ano de 1999.

O Ensino Médio foi realizado no Colégio Estadual Santo Antônio, no município de Imbituva - Paraná iniciando no ano 2000 e concluindo-o, em 2002.

No ano de 2003, ingressou no curso de Bacharelado em Engenharia Florestal, na Universidade Estadual do Centro Oeste – UNICENTRO, em período integral, terminando no ano de 2007.

No ano de 2009, ingressou no Mestrado do Curso de Pós Graduação em Ciências Florestais, na área de concentração de Manejo Florestal, concluindo-o no ano de 2011.

Em fevereiro de 2011, ingressou no Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração Manejo Florestal, concluindo-o em 2015.

“Solideo gloria”

Dedico este trabalho a minha esposa Edicélis e aos meus pais Arno e Maria Anice porque sempre me fizeram acreditar na realização dos meus sonhos e trabalharam muito para que eu pudesse realizá-los.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado capacidade e paciência para chegar até aqui, e por muitas vezes ouvir as minhas preces.

A CAPES – Coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de estudos.

À Universidade Federal do Paraná e ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal pelo amparo durante o período do Doutorado.

À Empresa Eldorado S.A. pela disponibilidade dos dados para realização desta pesquisa.

À minha orientadora Christel Lingnau pelo repasse de conhecimentos e auxílio nas correções da tese nestes quatro anos de doutorado.

Aos meus co-orientadores Álvaro Muriel Lima Machado e Afonso Figueiredo Filho pelas valiosas considerações.

Aos meus pais Arno Christiano Pesck e Maria Anice Scheidt Pesck pelo apoio contínuo nos estudos e sem eles não estaria aqui, nesta importante fase de minha vida.

À minha esposa Edicélis de Oliveira Pesck pelo amor e carinho, e pelos dias que fiquei distante de seus olhos.

Aos colegas e amigos do doutorado que foram muitos, em especial ao André Leonardo Bortolotto Buck, Maurício Koubay do Amaral, Rorai Pereira Martins Neto, Dagma Kratz, Jaçanan Eloisa Milani, Raphael Furlan e Murilo Trento.

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a aplicação da varredura *laser* terrestre simples e múltipla na detecção de árvores e na determinação do DAP em plantios clonais de *Eucalyptus* spp, considerando diferentes posicionamentos do equipamento e tamanho de unidades amostrais. O equipamento Trimble TX5 foi posicionado no centro e em quatro pontos externos à unidade amostral circular formando um quadrilátero. A varredura simples foi testada apenas com a posição do equipamento no centro da unidade amostral. Para varreduras múltiplas foram avaliadas dois e três arranjos de varredura, as quais levam em consideração a posição do equipamento em relação às linhas de plantio. A detecção automática de árvores foi realizada a partir do algoritmo baseado em uma malha de projeção de pontos 2D, onde unidades amostrais circulares de 200, 300 e 400 m² foram avaliadas. A determinação do DAP foi realizada pelo algoritmo de distância máxima, considerando os diferentes tamanhos das unidades amostrais para varreduras simples e múltiplas. A varredura simples, para a idade de 2 anos sem desrama, apresentou ótimos resultados, sendo que 100% das árvores em unidades amostrais de 200 e 300 m² foram detectadas. Para as idades de 2, 4,5 e 5,5 anos em unidades amostrais de 300 e 400 m², não foi possível a detecção de 100% das árvores com varredura simples, pois à medida que aumenta o diâmetro a acurácia diminui. A análise sobre varreduras múltiplas com dois posicionamentos do equipamento *laser* possibilitou a detecção de 100% das árvores nos três tamanhos de unidades amostrais até a idade de 4,5 anos. Para a idade de 5,5 anos, verificou-se a necessidade de empregar três varreduras para detecção de todas as árvores devido aos maiores diâmetros. A determinação do diâmetro médio para todas as idades não apresentou diferença estatística no nível de 95% de probabilidade, com erros variando entre -5,3% a 4,7%. Os resultados indicam que o número de varreduras com o intuito de detectar 100% das árvores está relacionado principalmente com o DAP médio, considerando o espaçamento de plantio neste estudo de caso.

Palavras chave: Detecção de árvores, unidades amostrais, determinação do DAP, varredura simples e múltipla.

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the use of single and multiple terrestrial laser scanning in detecting trees and in determining DBH in clonal plantations of *Eucalyptus* spp at varying equipment locations and in varying sample unit sizes. Trimble TX5 units were positioned in the center and at four locations external to the circular sample unit in the form of a quadrilateral. A simple scan was tested only at the center location of each sample unit. For multiple scans two and three scanning arrangements were assessed, taking into account the position of the equipment with respect to the plantation rows. Automatic detection was performed on trees using an algorithm based on grid of 2D projection points where circular sampling units of 200, 300 and 400 m² were evaluated. DBH was determined using the maximum distance algorithm, considering both the various sample unit sizes and single or multiple scan regime. A simple scan of a 2-year-old unpruned trees yielded excellent results, with 100% detection of the trees in sampling units within 200 and 300 meters. Meanwhile 100% of 2, 4.5 and 5.5-year-old trees in sample units of 300 and 400 m², could not be detected with a simple scan, because as diameter increases accuracy decreases. The analysis of multiple scans using laser equipment placed at two locations enabled detection of 100% of the trees in three sample unit sizes in trees up to 4.5 years old. At age 5.5 years, three scans were required to detect all trees because of their larger diameters. There was no statistical difference (at 95% probability) between mean diameters of an age group, with errors ranging from -5.3% to 4.7%. Results indicate that in order to detect 100% of the trees, the number of scans depends largely on the average DBH, given the plant spacing in this case study.

keywords: trees detection, sample units, dbh determination, simple and multiple scan.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - VARREDURA LASER TERRESTRE. (A) PRIMEIRA ESTAÇÃO LASER. (B) SEGUNDA ESTAÇÃO LASER. (A e B) - DADOS REFERENCIADOS UNIDOS EM UM MESMO SISTEMA DE COORDENADAS DÃO ORIGEM À VARREDURA MÚLTIPLA...	19
FIGURA 2 – DETECÇÃO DE ÁRVORES POR MEIO DA PROJEÇÃO DE PONTOS 2D. A) CORTE TRANSVERSAL DA SEÇÃO A 1,3 m. B) NÚMERO DE PONTOS REFLETIDOS EM CADA CÉLULA. C) CÉLULAS DETECTADAS E FILTRADAS.....	22
FIGURA 3 - PLANTIOS DE <i>Eucalyptus</i> spp.	27
FIGURA 4 - EQUIPAMENTO LASER TRIMBLE TX5.....	29
FIGURA 5 - TRIMBLE TX5 COM ÂNGULO MÁXIMO DE VISADA PARA A COLETA DE DADOS.	30
FIGURA 6 - OS CINCO POSICIONAMENTOS DO EQUIPAMENTO LASER UTILIZADOS PARA AS VARREDURAS EM UMA UNIDADE AMOSTRAL	31
FIGURA 7 - ALVOS ALOCADOS PARA O REGISTRO DA NUVEM DE PONTOS.....	33
FIGURA 8 - A) VISTA PLANAR DA NUVEM DE PONTOS. B) ALVO IDENTIFICADO NA NUVEM DE PONTOS.....	35
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE PROCESSAMENTO DOS DADOS LASER PARA DETECÇÃO AUTOMÁTICA DAS ÁRVORES.....	36
FIGURA 10 - DELIMITAÇÃO DOS TRÊS TAMANHOS DE UNIDADES AMOSTRAIS PARA A DETECÇÃO AUTOMÁTICA.....	37
FIGURA 11 - RECORTE TRANSVERSAL DA NUVEM DE PONTOS A 1,3 m. A) INDEXAÇÃO DE DUAS SEÇÕES TRANSVERSAIS E B) DETECÇÃO CORRETA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DEVIDO A AUSÊNCIA DE RUÍDOS ENTRE DUAS SEÇÕES COMO GALHOS OU SUB-BOSQUE.....	38
FIGURA 12 - ALGORITMO PARA O CÁLCULO DO DIÂMETRO EM UMA SEÇÃO TRANSVERSAL.	39
FIGURA 13 - VARREDURA SIMPLES E COMBINAÇÕES DE VARREDURAS DUPLAS E TRIPLAS VERSUS POSIÇÃO DO EQUIPAMENTO.	41

FIGURA 14 - DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA NAS IDADES: A) 2 ANOS (<i>E. grandis</i>) SEM DESRAMA NATURAL; B) 2 ANOS (<i>E. urophylla</i>); C) 4,5 ANOS (<i>E. urograndis</i>); D) 5,5 ANOS (<i>E. urograndis</i>).	46
FIGURA 15 - A) NUVEM DE PONTOS REGISTRADA. B) SEÇÃO TRANSVERSAL A UMA ALTURA DE 12 m. C) SEÇÃO TRANSVERSAL A 1,3 m.....	48
FIGURA 16 - VARREDURA SIMPLES EM UMA UNIDADE AMOSTRAL. A) VISUALIZAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS NO PLANO; B) 200 m ² ; C) 300 m ² ; D) 400 m ²	49
FIGURA 17 - DELIMITAÇÃO DE UMA UNIDADE AMOSTRAL DE 300 m ² INDICANDO UMA ÁRVORE NO LIMITE.	50
FIGURA 18 - A) RECORTE 2D DE UMA UNIDADE AMOSTRAL DE 400 m ² EM UM PLANTIO DE 2 ANOS. B) SEÇÃO TRANSVERSAL PRÓXIMA AO EQUIPAMENTO NA FORMA DE UM SEMICÍRCULO. C) SEÇÃO TRANSVERSAL NA BORDA DA UNIDADE AMOSTRAL.	51
FIGURA 19 - EFEITO DE SOMBREAMENTO OCASIONADO POR ÁRVORES PRÓXIMAS AO EQUIPAMENTO, EM UM PLANTIO DE 2 ANOS.	52
FIGURA 20 - ÁRVORES DETECTADAS AUTOMATICAMENTE A PARTIR DA VARREDURA SIMPLES POR IDADE DE PLANTIO, EM DIFERENTES TAMANHOS DE UNIDADES AMOSTRAIS.....	53
FIGURA 21 - ÁRVORES DETECTADAS POR MEIO DA VARREDURA SIMPLES NA ALTURA DO DAP E TRÊS ALVOS DETECTADOS ERRONEAMENTE COMO ÁRVORE.....	55
FIGURA 22 - COMBINAÇÃO DE VARREDURA “REFERÊNCIA E EXTERNA” POR UNIDADE AMOSTRAL: 200 m ² (A), 300 m ² (B) e 400 m ² (C). 57	
FIGURA 23 - DETECÇÃO AUTOMÁTICA POR UNIDADE AMOSTRAL DE 200, 300 e 400 m ² A PARTIR DE VARREDURAS OPOSTAS.....	58
FIGURA 24 - DETECÇÃO AUTOMÁTICA POR UNIDADE AMOSTRAL DE 200 m ² (A), 300 m ² (B) e 400 m ² (C) COM A COMBINAÇÃO DE VARREDURAS PERPENDICULAR.....	59
FIGURA 25 - DETECÇÃO AUTOMÁTICA POR UNIDADE AMOSTRAL DE 200 m ² (A), 300 m ² (B) E 400 m ² (C) COM A COMBINAÇÃO DE VARREDURAS “PARALELAS”.....	60
FIGURA 26 - (A) DETECÇÃO DE ÁRVORES EM VARREDURA OPOSTA E (B) VARREDURA PARALELA AS LINHAS DE PLANTIO.	61

FIGURA 27 - DETECÇÃO AUTOMÁTICA POR UNIDADE AMOSTRAL DE 200 m ² (A), 300 m ² (B) E 400 m ² (C) A PARTIR DA VARREDURA MÚLTIPLA “REFERÊNCIA E OPOSTAS”.....	62
FIGURA 28 - DETECÇÃO AUTOMÁTICA POR UNIDADE AMOSTRAL DE 200 m ² (A), 300 m ² (B) E 400 m ² (C) A PARTIR DA VARREDURA MÚLTIPLA “REFERÊNCIA E PERPENDICULARES”.....	63
FIGURA 29 - A) PROJEÇÃO 2D DE UMA NUVEM DE PONTOS PARA A VARREDURA “REFERÊNCIA E PERPENDICULARES” EM UMA UNIDADE AMOSTRAL DE 400 m ² PARA O PLANTIO DE 2 ANOS. B) DETALHE DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS NA BORDA DA UNIDADE AMOSTRAL.....	64
FIGURA 30 - SEÇÃO TRANSVERSAL OBTIDA ATRAVÉS DA VARREDURA SIMPLES.....	67
FIGURA 31 - DIÂMETROS MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS POR IDADE EM UNIDADES AMOSTRAIS DE 200 m ² . CAMPO (1), SIMPLES (2), OPOSTAS (3), PARALELAS (4), PERPENDICULARES (5), REFERÊNCIA E EXTERNA (6), REFERÊNCIA E PERPENDICULARES (7) E REFERÊNCIA E OPOSTAS (8).	68
FIGURA 32 - DIÂMETROS MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS POR IDADE, EM UNIDADES AMOSTRAIS DE 300 m ² . CAMPO (1), SIMPLES (2), OPOSTAS (3), PARALELAS (4), PERPENDICULARES (5), REFERÊNCIA E EXTERNA (6), REFERÊNCIA E PERPENDICULARES (7) E REFERÊNCIA E OPOSTAS (8).	70
FIGURA 33 - DIÂMETROS MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS POR IDADE, EM UNIDADES AMOSTRAIS DE 400 m ² . CAMPO (1), SIMPLES (2), OPOSTAS (3), PARALELAS (4), PERPENDICULARES (5), REFERÊNCIA E EXTERNA (6), REFERÊNCIA E PERPENDICULARES (7) E REFERÊNCIA E OPOSTAS (8).	71
FIGURA 34 - DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DE ERROS NA IDADE DE 5,5 ANOS EM UNIDADES AMOSTRAIS DE 400 m ² PARA OS ARRANJOS DE VARREDURA “REFERÊNCIA”, “REFERÊNCIA E EXTERNA” E “REFERÊNCIA E OPOSTAS”.....	73

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO COM VARREDURAS SIMPLES E MÚLTIPLAS.....	25
TABELA 2 - DADOS DAS UNIDADES AMOSTRAIS DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	28
TABELA 3 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO TRIMBLE TX5.....	30
TABELA 4 - REGRA DE DECISÃO PARA COMPARAÇÃO.	43
TABELA 5 - ARRANJO FATORIAL, PARA A ANÁLISE DA VARIÂNCIA.	44
TABELA 6 - PORCENTAGEM MÉDIA DE ÁRVORES DETECTADAS.....	53
TABELA 7 - PRECISÃO DE DETECÇÃO DE ÁRVORES PARA VARREDURA SIMPLES RELATADA EM ESTUDOS ANTERIORES EM COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS OBTIDOS NESTA PESQUISA.....	56
TABELA 8 - RESULTADO DA DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE ÁRVORES UTILIZANDO DIFERENTES TAMANHOS DE UNIDADES AMOSTRAIS E NÚMERO DE VARREDURAS.	64
TABELA 9 - RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO L&O PARA O NÚMERO DE ÁRVORES OBTIDOS NO CAMPO E PELO ALGORITMO DE DETECÇÃO AUTOMÁTICA.....	65
TABELA 10 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA REFERENTE AO TAMANHO DAS UNIDADES AMOSTRAIS E COMBINAÇÃO DE VARREDURAS.	75

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	14
1.2 HIPÓTESES.....	14
1.3 OBJETIVO GERAL	15
2. REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 LEVANTAMENTO DE DADOS A PARTIR DA VARREDURA LASER TERRESTRE.....	16
2.2 VARREDURAS SIMPLES E MÚLTIPLA	18
2.3 DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE ÁRVORES.....	20
2.4 DETERMINAÇÃO DE DIÂMETROS	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	27
3.2 LEVANTAMENTO DE CAMPO CONVENCIONAL	28
3.3 VARREDURA LASER TERRESTRE	29
3.3.1 Equipamento <i>laser</i>	29
3.3.2 Varredura <i>laser</i>	31
3.4 REGISTRO DAS NUVENS DE PONTOS PARA VARREDURAS MÚLTIPLAS	32
3.5 ALGORITMO DE DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE ÁRVORES	35
3.6 DETERMINAÇÃO DE DIÂMETROS <i>versus</i> NÚMERO DE VARREDURAS	39
3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA	42
3.7.1 Teste L&O para número de árvores.....	42
3.7.2 Delineamento experimental para determinação dos diâmetros	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1 DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA.....	45

4.2 REGISTRO.....	47
4.3 DELIMITAÇÃO DA UNIDADE AMOSTRAL	49
4.4 AVALIAÇÃO DO POSICIONAMENTO DO EQUIPAMENTO <i>versus</i> TAMANHO DA UNIDADE AMOSTRAL PARA DETECÇÃO DE ÁRVORES....	51
4.4.1 Varredura simples.....	51
4.4.2 Duas varreduras	56
4.4.3 Três varreduras.....	61
4.4.4 Análise estatística	65
4.5 DETERMINAÇÃO DE DIÂMETROS	66
4.5.1 Número de varreduras <i>versus</i> determinação do DAP.....	66
4.5.2 Análise estatística	74
5. CONCLUSÕES.....	77
6. RECOMENDAÇÕES	78
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
8. APÊNDICES	86

1. INTRODUÇÃO

A varredura *laser* terrestre (TLS – *Terrestrial Laser Scanning*) permite realizar medições detalhadas das árvores, que vão do tronco até pequenos galhos ou folhas, dependendo da resolução adotada. A motivação inicial para a utilização do TLS é a obtenção de variáveis dendrométricas por meio de métodos não destrutivos, vindo a substituir os métodos convencionais de campo em inventários florestais e monitoramento de florestas.

O uso da varredura *laser* terrestre em silvicultura, para mapeamento da vegetação e planejamento do manejo florestal, avançou consideravelmente na última década (KANKARE *et al.*, 2013). Os equipamentos TLS têm um elevado potencial, pois, adquirem dados tridimensionais de árvores com precisão e rapidez, como a altura das árvores, diâmetro à altura do peito (DAP), cobertura do dossel e volumes em nível de unidade amostral (BIENERT *et al.*, 2006a; HOPKINSON *et al.*, 2004), o que resultou no uso extensivo desta tecnologia no estudo de ambientes florestais (DASSOT *et al.*, 2011; LOVELL *et al.*, 2011).

O primeiro passo, para a mensuração de variáveis dendrométricas usando o TLS, é a detecção ou mapeamento das árvores, e por motivos de tempo de processamento, essa detecção deve ser de forma automatizada (ASCHOFF *et al.*, 2004). Os métodos para detecção podem ser realizados no espaço bidimensional (2D) ou tridimensional (3D), utilizando varreduras simples ou múltiplas. Para varredura simples, geralmente o equipamento é posicionado no centro da unidade amostral (uma estação *laser*) e a aquisição dos dados é de forma parcial formando semicircunferências. Na abordagem de varreduras múltiplas, utilizando mais de duas posições do equipamento (duas ou mais estações *laser*) tem-se toda a superfície do tronco da árvore recoberta por pontos *laser*, formando circunferências, porém os dados dos diferentes posicionamentos precisam ser corrigidos para um sistema de coordenadas comuns, através da operação de registro.

No entanto, também é possível a utilização de dados de varredura simples para a extração de parâmetros de inventário florestal em parcelas pequenas (KIRÁLY e BROLLY, 2008), onde a quantidade de dados é menor e o registro das nuvens de pontos não é necessário, aumentando a rapidez na coleta de dados. Mass *et al.* (2008), Litkey *et al.* (2008) e Liang *et al.* (2010), realizaram um estudo

piloto a partir de uma posição de varredura, adotando parcelas de 12 até 15 m de raio onde obtiveram resultados acurados na detecção das árvores e obtenção de diâmetros.

Diferentes estudos têm sido publicados com o objetivo de determinar diâmetros a partir de nuvens de pontos 3D (SIMONSE *et al.*, 2003; HOPKINSON *et al.*, 2004; WATT e DONOGHUE, 2005; HENNING e RADTKE, 2006). Outros parâmetros para descrever a geometria da árvore como diâmetros ao longo do fuste, parte livre de galhos e diâmetro da copa são estimados, pois são variáveis de difícil aquisição, impossíveis de serem obtidas sem o corte da árvore (PFEIFER *et al.*, 2004), porém estes parâmetros não são abordados nesta pesquisa.

Com isso, o objetivo desta pesquisa foi desenvolver um algoritmo, para detecção de árvores, aplicando em diferentes tamanhos de unidades amostrais, considerando varreduras simples e múltiplas, verificando assim, qual o melhor posicionamento do equipamento para a detecção do maior número de árvores na parcela. A segunda parte da pesquisa consistiu na realização de estudos diamétricos, adotando varreduras simples e múltiplas, em plantios clonais de *Eucalyptus* spp.

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema da pesquisa consiste na detecção automática de árvores em diferentes tamanhos de unidades amostrais e determinação de diâmetros utilizando varreduras simples e múltiplas para definir qual a melhor forma de levantamento de dados com o *laser* terrestre.

1.2 HIPÓTESES

As hipóteses levantadas para responder o problema de pesquisa são:

I. O uso de varreduras simples e múltipla é eficaz em detectar 100% das árvores, independente do tamanho da amostra.

II. A determinação de diâmetros com varreduras simples e múltipla diferem estatisticamente do obtido de forma convencional, nos diferentes tamanhos de unidades amostrais, considerando os diferentes posicionamentos do equipamento.

1.3 OBJETIVO GERAL

Testar a aplicação da varredura simples e múltipla com o TLS para a detecção de árvores em plantios clonais de *Eucalyptus* spp, a partir de unidades amostrais circulares assim como a determinação de diâmetros. Desta forma este estudo contempla os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver e avaliar um algoritmo para detecção automática de árvores;
- Avaliar o uso de varreduras simples e múltipla para detecção de árvores em unidades amostrais circulares de 200, 300 e 400 m²;
- Testar um algoritmo para determinar o diâmetro, nos diferentes tamanhos de unidades amostrais, com varreduras simples e múltipla, considerando os diferentes posicionamentos do equipamento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 LEVANTAMENTO DE DADOS A PARTIR DA VARREDURA LASER TERRESTRE

O uso da varredura *laser terrestre* (TLS) na área florestal é uma alternativa na determinação de variáveis dendrométricas, quantificação de biomassa e estoque de madeira a partir de unidades amostrais, e apresenta como uma solução para a obtenção de dados de elevada qualidade (LIANG *et al.*, 2013; TROCHTA *et al.*, 2013; SIMONSE *et al.*, 2003; HENNING *et al.*, 2006).

Baseada na tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) o TLS permite a obtenção de dados tridimensionais da floresta, com precisão (THIES e SPIECKER, 2004) e minimizando os erros pelas coletas tradicionais, em campo de inventário florestal, causados muitas vezes, por falha humana, má operação de equipamentos ou por condições adversas, como vegetação densa ou até cansaço da equipe (HOPKINSON *et al.*, 2004).

As variáveis coletadas no inventário convencional normalmente se limitam à altura (H) e ao diâmetro a altura do peito (DAP). A obtenção de variáveis mais complexas, como diâmetros ao longo do fuste, necessários para ajuste de equações de volume e funções de afilamento, são praticamente inviáveis de serem obtidas sem a derrubada da árvore. O uso de dados TLS permite a quantificação de galhos e folhas, e a modelagem completa do tronco por meio do processamento da nuvem de pontos tridimensional, sem o abate das árvores (BIENERT *et al.*, 2006a).

A tecnologia TLS está se popularizando, principalmente na Europa, para a determinação de variáveis dendrométricas, devido ao rápido progresso técnico e científico neste campo ao longo de uma década, (SIMONSE *et al.*, 2003, THIES e SPIECKER, 2004 e HOPKINSON *et al.*, 2004), porém o elevado custo do instrumento (PUESCHEL *et al.*, 2013), e a falta de *software* específico para o setor florestal e treinamento de pessoal para processamento dos dados (LIANG *et al.*, 2014), a aplicação desta tecnologia em grande escala, ainda não é operacional.

Inventários florestais, em geral, são realizados por amostragem usando parcelas ou unidades amostrais com tamanho e formas variados (circulares

retangulares ou quadradas). Nessas unidades são medidos os diâmetros (DAP) de todas as árvores e a altura de todas ou apenas de parte das árvores. A coleta de dados no inventário florestal convencional é demorada e mais susceptível a erros seja ele instrumental, do operador ou da própria conceituação matemática na transformação de circunferências de fustes excêntricos para diâmetros ou para áreas transversais (MACHADO E FIGUEIREDO FILHO, 2006) quando comparados com o *laser*, assim métodos e tecnologias de aceleração do trabalho e redução de custos (WEZYK *et al.*, 2007) têm sido propostos.

O sistema LiDAR, tanto sob a forma de varredura *laser* aerotransportado (ALS) como de varredura *laser* terrestre (TLS) permite a obtenção de forma rápida de dados acerca da estrutura da floresta a partir de uma nuvem de pontos em 3D, sendo processada para gerar informações, tais como: detecção de árvores, diâmetro (DAP) e a altura das árvores (ASCHOFF e SPIECKER, 2004; BIENERT *et al.*, 2006a; NÆSSET *et al.*, 2005; SIMONSE *et al.*, 2003; HOPKINSON *et al.*, 2004).

A precisão dos dados da varredura *laser* e o número de variáveis dendrométricas que podem ser obtidas de forma automatizada caracterizam o diferencial desta tecnologia. A nuvem de pontos, também pode ser trabalhada para o acompanhamento de tratos silviculturais como, por exemplo, em simulações de podas e desbastes (LINGNAU *et al.*, 2009).

Segundo Mass *et al.* (2008), o equipamento *laser* é utilizado para o levantamento de informações quantitativas de difícil mensuração que são exploradas no processamento, tais como: geometria ao longo do tronco da árvore, tortuosidade, inserção de galhos e danos presentes no tronco.

Neste contexto, pesquisadores direcionam os esforços para a aplicação do TLS, em levantamentos florestais. O processamento de dados para obtenção de variáveis dendrométricas de forma automatizada é o grande desafio a ser superado para viabilização desta tecnologia como ferramenta aos profissionais do setor florestal (BUCK, 2012).

Há um número considerável de pesquisas focadas na determinação do DAP utilizando varreduras simples, porém neste caso não há necessidade de instalação de alvos de referencia para realização do registro da nuvem de pontos; sendo assim, há a vantagem de serem menos trabalhosas, do que estimativas a partir da

combinação de várias varreduras (OTHMANI *et al.*, 2011, LOVELL *et al.*, 2011, MOSKAL e ZHENG 2012; SEIDEL *et al.*, 2012).

O TLS oferece um elevado potencial para medições tridimensionais em pequenas áreas (FLECK *et al.*, 2011; JUNG *et al.*, 2011; SCHILLING *et al.*, 2012; SEIDEL *et al.*, 2012; KANKARE *et al.*, 2013) com capacidade de adquirir informações estruturais 3D com um nível de detalhe que é consideravelmente superior à plataforma aerotransportada (LICHTI *et al.*, 2002), sendo possível a mensuração das características importantes de uma árvore e sua geometria no ponto de vista do inventário florestal, tais como diâmetros a diferentes alturas, altura, densidade, área basal e volume (HOPKINSON *et al.*, 2004; PFEIFER e WINTERHALDER, 2004; VASTARANTA *et al.*, 2009; DASSOT *et al.*, 2012; LIANG *et al.*, 2012).

Dados TLS também permitem análises temporais, porque toda a nuvem de pontos pode ser coletada ao longo do tempo (LIANG *et al.*, 2012), e também para analisar as árvores em 3D, estrutura de copa e volume de ramos (BUCKSCH *et al.*, 2010; SCHILLING *et al.*, 2012) e biomassa (CLARK *et al.*, 2011; DUBAYAH *et al.*, 2010; HUDAK *et al.*, 2012; NÆSSET *et al.*, 2013; LAURIN *et al.*, 2014).

2.2 VARREDURAS SIMPLES E MÚLTIPLA

O levantamento de dados utilizando TLS pode ser realizado por meio de uma ou de múltiplas estações. Quando a medição é realizada utilizando apenas uma estação *laser*, a nuvem de pontos gerada pode ser qualificada como dados de varredura simples e recobre apenas uma parte do fuste (FIGURA 1A ou 1B). O recobrimento total da árvore por pontos *laser* pode ser alcançado com duas ou mais varreduras, porém é necessária a operação de registro das nuvens tomadas em diferentes posições, no caso árvores, assim a nuvem de pontos gerada é classificada como múltipla (FIGURA 1A e 1B) (BUCK, 2012; SILVA *et al.*, 2013).

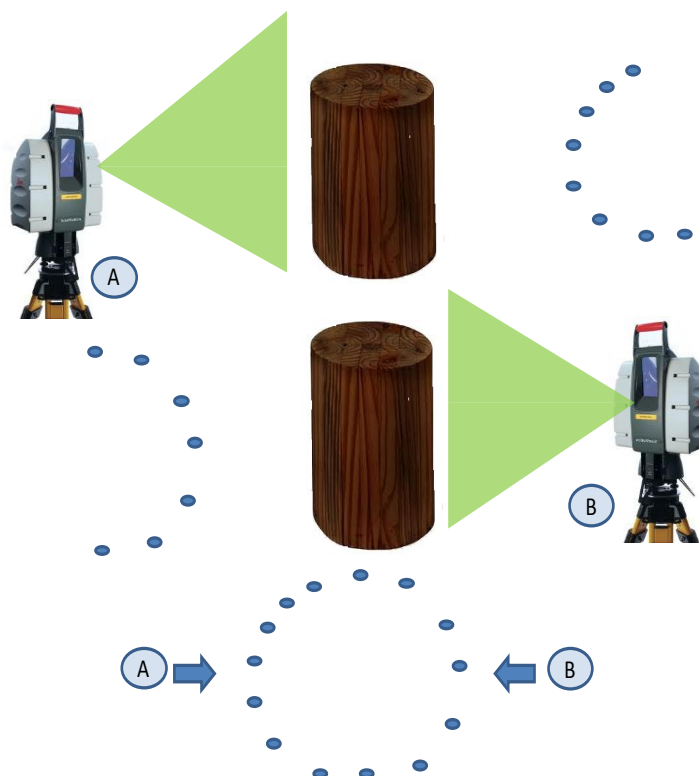


FIGURA 1 - VARREDURA LASER TERRESTRE. (A) PRIMEIRA ESTAÇÃO LASER. (B) SEGUNDA ESTAÇÃO LASER. (A e B) - DADOS REFERENCIADOS UNIDOS EM UM MESMO SISTEMA DE COORDENADAS DÃO ORIGEM À VARREDURA MÚLTIPLA.

FONTE: BUCK, (2012); SILVA *et al.* (2011).

A vantagem da varredura simples é o tempo reduzido para aquisição de dados, enquanto que a coleta de varredura múltipla consome mais tempo, principalmente, devido à necessidade de alocação de alvos para o registro das coordenadas, o trabalho de transportar, reinstalar o equipamento em diferentes locais pode onerar a realização do levantamento (BIENERT *et al.*, 2006a). Porém, garante um nível maior de detalhamento necessário para estudos de geometria e volumetria das árvores (BUCK, 2012). Portanto, na medição de árvores, os dados de varredura simples irão representar apenas parte do fuste, enquanto que dados de varredura múltipla podem representar o fuste completo (THIES e SPIECKER, 2004).

A utilização de varredura simples apesar de ser mais rápida quando comparada com a varredura múltipla, permite a obtenção de somente uma porção do fuste, onde a seção transversal é representada por um semicírculo. As varreduras múltiplas possibilitam uma reconstrução completa dos troncos das árvores, mas requer o registro das nuvens de pontos geradas de cada varredura.

O tempo para realizar a varredura em cada posicionamento do equipamento é dependente da resolução, porém o tempo independe se os povoamentos são densos ou abertos considerando a mesma resolução de coleta, o que oferece vantagens sobre os métodos convencionais de inventário.

Abordagens sobre varreduras simples não necessitam da instalação de alvos no campo e o pré-processamento é mais rápido, uma vez que não requer o registro da nuvem de pontos. Todavia, em varreduras simples as árvores, especialmente aquelas com DAP menores que 5 cm, muitas vezes, não são possíveis de serem detectadas na nuvem de pontos (LOVELL *et al.*, 2011, SEIDEL *et al.*, 2012; SEIDEL e AMMER, 2014).

O emprego do TLS para o inventário florestal em nível de unidade amostral, utilizando varreduras simples ou múltiplas têm sido realizados (LIANG *et al.*, 2013, LIANG *et al.*, 2014; TROCHTA *et al.*, 2013; SIMONSE *et al.*, 2003; HENNING *et al.*, 2006; SCHILLING *et al.*, 2012; LI *et al.*, 2014), sendo que os resultados para varreduras múltiplas são superiores aos de varreduras simples.

Varreduras simples e múltiplas foram testadas por Thies e Spiecker (2004) para a medição do diâmetro à altura do peito (DAP), altura total e altura da base da copa em comparação aos métodos tradicionais de medição, utilizando sutas e fitas métricas. Os resultados obtidos na determinação do DAP quando comparados aos métodos tradicionais (suta e fita) indicaram um desvio padrão de 1,3%.

2.3 DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE ÁRVORES

Na análise das informações contidas na nuvem de pontos, um dos primeiros procedimentos é detectar as árvores e seu respectivo posicionamento (ASCHOFF e SPIECKER, 2004).

Para fins de inventário florestal é importante, por motivos de tempo de processamento e viabilidade da aplicação da tecnologia em larga escala, que a detecção das árvores seja automatizada (ASCHOFF *et al.*, 2004). No entanto, nada impede que a detecção e isolamento sejam realizados manualmente, por meio de *softwares* de visualização da nuvem de pontos, principalmente considerando árvores individuais e não em situação de unidades amostrais.

Um dos métodos mais aplicados para a detecção tem sido a transformação “*Hough*”, que identifica semicircunferências para varreduras simples e circunferências em varreduras múltiplas (SIMONSE *et al.*, 2003; ASCHOFF; THIES; SPIECKER, 2004; BIENERT *et al.*, 2007). A aplicação da transformação “*Hough*” é feita realizando cortes transversais a determinada(s) altura(s) do solo com uma pequena espessura, por exemplo, um corte a 1,30 m do solo com uma espessura de 10 cm (1,25 m a 1,35 m). A visualização da nuvem de pontos proporcionada pelo corte transversal permite identificar as árvores por meio de um agrupamento de pontos com o padrão de uma semicircunferência ou uma circunferência.

Outros algoritmos têm sido utilizados com sucesso para detectar automaticamente as árvores, como a intensidade de retorno LIDAR, (LOVELL *et al.*, 2011), já que o tronco das árvores tem uma refletância diferente do sub-bosque por exemplo, alcançando uma precisão de 76% para varredura simples em florestas de *Pinus ponderosa*.

Simonse *et al.* (2003), detectaram corretamente 26 árvores de um total de 28 tendo como medida de referência os dados obtidos por uma estação total, usando o mesmo algoritmo descrito anteriormente. As duas árvores que não foram detectadas estavam ocultas por pequenos galhos que encobriam a visada do equipamento. Esses autores consideraram o uso deste método como promissor visto os resultados que foram obtidos.

Outras formas de detecção automática de árvores como a fatia 2D, proposta por Bienert *et al.* (2007) foram pesquisados. Neste caso, o procedimento é mais simples que a aplicação da transformação de “*Hough*”, envolvendo algoritmos menos complexos. O método analisa os pontos em uma dada altura em geral o DAP. O espaço total é dividido por uma malha, onde em cada célula é somado o número de pontos encontrados (FIGURA 2). O tamanho desta malha é definido em função da resolução de varredura, ou seja, quanto menor a resolução, maior será o tamanho da malha. No momento da varredura, com base nos parâmetros do *scanner*, é possível prever quantos pontos devem retornar por célula quando se atinge um objeto. Os autores definiram como limiar que cada célula, para ser parte de uma árvore, deveria ter pelo menos 13 pontos refletidos. As células que têm um valor igual ou superior a 13 são separadas e avaliadas com suas vizinhas para então definir se realmente se trata de uma árvore (SILVA, 2011).

Na FIGURA 2A, é demonstrado a projeção 2D de um corte transversal realizado a 1,30 m de altura com espessura de 10 cm plotadas sob uma malha com células de 5 x 5 cm. Na Figura 2B os pontos refletidos são contabilizados nas respectivas células. E por fim, na Figura 2C são detectadas, filtradas e agrupadas as células que compõem uma árvore, com um número mínimo de pontos definidos pelo usuário.

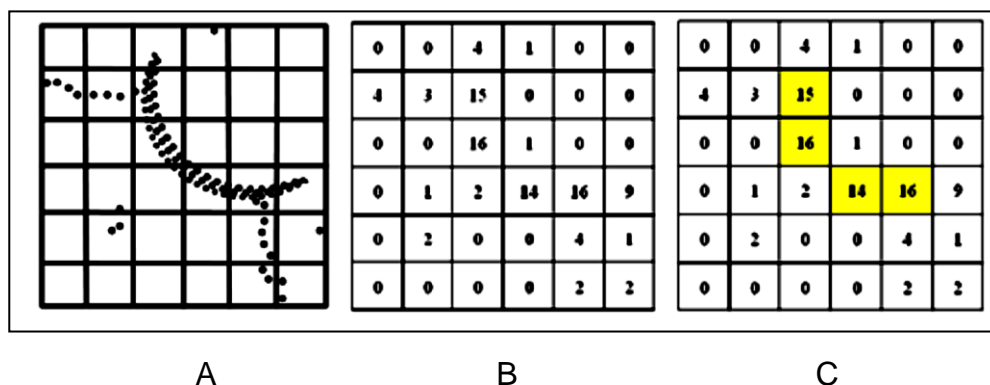


FIGURA 2 – DETECÇÃO DE ÁRVORES POR MEIO DA PROJEÇÃO DE PONTOS 2D. A) CORTE TRANSVERSAL DA SEÇÃO A 1,3 m. B) NÚMERO DE PONTOS REFLETIDOS EM CADA CÉLULA. C) CÉLULAS DETECTADAS E FILTRADAS. FONTE: BIENERT *et al.* (2007).

A detecção automática de árvores em florestas mistas, caracterizadas por 95 % de faia (*Fagus sylvatica* L.) e 5% de carvalho (*Quercus spec.*), a partir do algoritmo denominado de “Fatia 2D” (THIES e SPIECKER 2004), foi possível detectar 22% e 52% de árvores para varreduras simples e múltiplas, respectivamente, em unidades amostrais de 900 m².

Li *et al.* (2014) avaliaram um algoritmo de detecção automática em um experimento com árvores espaçadas regularmente (1,29 x 1,29 m) e identificaram corretamente 98% das árvores na unidade amostral de 666,7 m², tamanho próximo ao utilizado nesta presente pesquisa.

A resolução de varredura também pode influenciar na detecção de árvores dependendo do tamanho da unidade amostral e densidade de árvores. Em Strahler *et al.* (2008) e Lovell *et al.* (2011), as taxas de detecção foram menores nas unidades amostrais de alta densidade devido ao efeito de sombreamento. O instrumento utilizado nos estudos citados anteriormente é baseado na diferença de fase similar ao adotado nesta presente pesquisa, porém as características da

floresta são distintas. Segundo Liang, (2013), os resultados são mais relacionados ao mecanismo de medição do *scanner*, do que do próprio algoritmo de detecção.

Liang *et al.* (2012) detectaram corretamente 73% das árvores presentes em unidades amostrais circulares com 10 m de raio em florestas boreais da Finlândia, com densidade de 1022 árvores.ha⁻¹. Cabe destacar que a distribuição espacial das árvores em florestas boreais é diferente de plantios florestais no Brasil, onde as árvores encontram-se plantadas em linhas e com espaçamentos regulares. Em florestas boreais a variação da amplitude diamétrica também é muito mais variável do que em povoamentos clonais. Para varreduras múltiplas no mesmo tipo de floresta Liang e Hyypä, (2013) obtiveram uma acurácia de 96% e alegaram que varreduras múltiplas, mostram ser a técnica mais precisa, porém, com maior tempo de processamento, nem sempre mostrando ser o mais viável e prático, devido ao tempo de deslocamento para as diferentes estações de varredura e também o tratamento semiautomático ou automático para o registro das nuvens de pontos.

A detecção do posicionamento da árvore apresenta alta acuracidade quando obtida pelo *laser* (THIES e SPIECKER, 2004) e em alguns casos 95% das árvores testadas foram detectadas corretamente (BIENERT *et al.*, 2006). Em varreduras simples onde algumas árvores ficam ocultas (efeito sombra) a detecção fica comprometida e, neste caso, cerca de 85% das árvores foram detectadas corretamente.

Para distâncias mais curtas (até 15 m) a detecção automática identifica corretamente 100% das árvores para as condições de florestas boreais (LITKEY *et al.*, 2008). Segundo os mesmos autores, o posicionamento e o campo visual a partir do ponto de instalação do equipamento são fundamentais para a detecção e posterior extração de informações do fuste.

Sabe-se que a alocação do equipamento em campo afeta diretamente a detecção das árvores no levantamento de dados. A sobreposição de árvores é apontada como sendo o principal problema na detecção dos indivíduos. Desta forma, é recomendada a utilização de um maior número de estações *laser* para evitar a sobreposição de árvores na varredura (LIANG *et al.*, 2008; LITKEY *et al.*, 2008).

2.4 DETERMINAÇÃO DE DIÂMETROS

O TLS permite a rápida aquisição e representação dos dados (THIES e SPIECKER, 2004), e a extração de importantes variáveis dendrométricas como área transversal (KIRÁLY e BROLLY, 2010), diâmetros a diferentes alturas (LINGNAU *et al.*, 2009; LINGNAU *et al.*, 2009; SILVA, 2011; MARTINS NETO *et al.*, 2013; BUCK, 2012) e volume total (BUCK *et al.*, 2012) sem a necessidade do corte das árvores (BIENERT *et al.*, 2006b).

Estudos têm sido, portanto, focados principalmente, na extração dos atributos de árvores que são mais comumente usados na tomada de decisões florestais, ou seja, a determinação do DAP (LIANG *et al.*, 2008; LITKEY *et al.*, 2008; MAAS *et al.*, 2008; BROLLY e KIRALY, 2009; TANSEY *et al.*, 2009; HUANG *et al.*, 2011; LOVELL *et al.*, 2011).

O método mais popular para determinar o DAP é cortar uma fatia a partir da nuvem de pontos original e detectar as seções transversais nesta camada (MAAS *et al.*, 2008; BROLLY e KIRALY, 2009; TANSEY *et al.*, 2009; HUANG *et al.*, 2011). O problema com esta ideia é a suposição de que todas as árvores apresentam um tronco livre de galhos, casca ou sub-bosque, por exemplo, porém este pressuposto não é válido na maioria das florestas (LIANG, 2013).

A medição automática do DAP, a partir de dados TLS foram estudados em várias pesquisas (TABELA 1). Por exemplo, Huang *et al.* (2009), implementaram um ajuste de uma circunferência para medir o DAP e concluíram que o algoritmo resultou em um diâmetro menor, quando a seção transversal apresenta um número baixo de pontos *laser*. Hopkinson *et al.* (2004) estimaram o DAP ajustando um cilindro para os dados TLS. Troncos representados com pontos esparsos foram omitidos da análise. Embora a dispersão residual fosse maior em plantios homogêneos, os autores obtiveram um R^2 de 0,85 entre a medição convencional e o *laser*. Bienert *et al.* (2006) usaram um algoritmo de ajuste de uma circunferência e alegam que as medições TLS podem apresentar erros, devido à falta de pontos no troncos devido ao efeito de sombreamento. Watt e Donoghue (2006), concluíram que as medições precisas a partir de um conjunto de dados TLS, o DAP pode ser obtido apenas com a metade da seção transversal coberta por pontos.

Estudos diamétricos em florestas boreais, com alta densidade de árvores (1024 árvores/há⁻¹) utilizando varredura simples obteve erro médio de 0,74 cm a 2,41 cm (LIANG, 2013), porém para varreduras múltiplas ocorreu melhoria significativa, com erro médio na ordem de 0,06 cm (LIANG, 2013).

TABELA 1 - MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO COM VARREDURAS SIMPLES E MÚLTIPLAS.

Autores	Método	Número de árvores	Número de varreduras	Resultado
Aschoff e Spiecker, (2004)	Ajuste de um círculo. Seção de 1,2 e 1,3 m.	-	1 e 5	NA
Bienert <i>et al.</i> (2006)	Ajuste de um círculo. Seção de 1,3 m.	79	1 e 3	RMSE = 1,21 a 2,47 cm
Brolly e Kiraly, (2009)	Ajuste de múltiplos círculos. Seções de 1 m, 1,5 m e 2 m.	154	1	RMSE = 4,2 cm
Hopkinson <i>et al.</i> (2004)	Ajuste de um cilindro entre 1,25 e 1,75 m.	128	5	R ² = 0,85
Huang <i>et al.</i> (2009)	Ajuste de um círculo. Seção de 1,3 m.	26	4	R ² = 0,79
Tansey <i>et al.</i> (2009)	Transformação de Hough. Seção de 1,27 e 1,33 m.	8	4	RMSE = 1,9 a 3,7 cm.
Thies e Spiecker, (2004)	Transformação de Hough. Seção de 1,3 m.	11	1 e 4	NA
Watt e Donoghue, (2005)	Ajuste de um círculo. Seção de 1,3 m	12	1 4	R ² = 0,92
Wezyk <i>et al.</i> (2007)	Ajuste de um cilindro entre 1,28 e 1,32 m.	199	1 e 2	R ² > 0,92

Entre as várias medidas florestais, o diâmetro ao longo do tronco ou o DAP é um importante atributo de inventário florestal, pois eles servem como um parâmetro fundamental na alometria da árvore, e estimativa de área basal, proporcionando, assim, informações valiosas sobre árvores individuais e estrutura de povoamento florestal (MOSKAL e ZHENG, 2012).

As pesquisas indicam que o TLS pode ser usado para medir com precisão os atributos de árvores. Srinivasan *et al.* (2015), com o objetivo de medir diâmetros ao longo do tronco utilizando o ajuste de um cilindro, detectaram que devido à presença de galhos e folhas, poucos pontos são refletidos do tronco, gerando estimativas menos precisas nas partes mais altas das árvores.

Os resultados relatados anteriormente, para diferentes tipos de florestas e diferentes cenários, indicam que os métodos ainda estão em desenvolvimento. Mais pesquisas são necessárias para explorar a aplicabilidade do *laser* em medir atributos

das árvores em nível de unidade amostral. Recentemente tem havido um crescente interesse em estudos utilizando varredura simples (LIANG *et al.*, 2008; LITKEY *et al.*, 2008; MAAS *et al.*, 2008; STRAHLER *et al.*, 2008; BROLLY e KIRALY., 2009; LOVELL *et al.*, 2011), embora a utilização de varreduras múltiplas é considerada como o melhor método para a determinação de diâmetros.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada no município de Três Lagoas – MS, em áreas de plantios clonais de *Eucalyptus* spp. com espaçamento regular de 3,6 m x 2,2 m (FIGURA 3) e com uma densidade de 1262 arv.ha⁻¹.

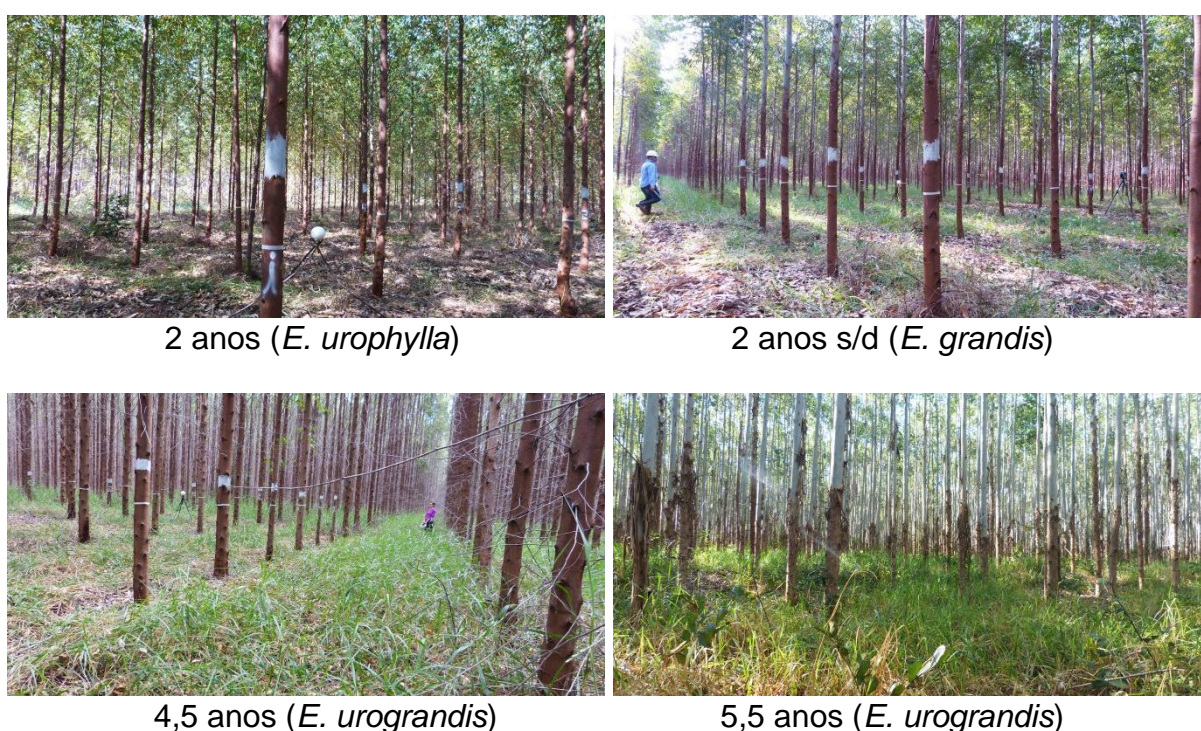


FIGURA 3 - PLANTIOS DE *Eucalyptus* spp.
FONTE: O autor (2015).

A área de estudo tem como característica um relevo plano a suave ondulado com pouco sub-bosque. No relevo plano, as linhas de plantio estão perpendiculares às estradas e no relevo suave ondulado, as linhas do plantio encontram-se em curvas de nível, como prática para conservação do solo.

Para a posterior análise e validação de resultados, as árvores foram numeradas e demarcadas com tinta e fita adesiva branca (FIGURA 3), destacando a letra adotada para identificação das parcelas em cada idade, árvores limítrofes e o ponto de medição do diâmetro à altura do peito (1,30 m).

Para a realização desta pesquisa foram mensurados plantios com idades de dois anos sem desrama, dois anos, quatro anos e meio e cinco anos e meio. A idade de dois anos (*E. grandis*) tem como característica a presença de galhos desde a base do tronco, e foi considerado na análise dos dados para avaliar se há interferência dos galhos na detecção das árvores. Cabe destacar que nos demais povoamentos a desrama é natural, ou seja, ocorre sem tratos silviculturais. A realização da medição convencional para validação dos resultados da varredura *laser* nestas idades (FIGURA 3) deve-se ao período em que é realizado o inventário florestal.

O sub-bosque pode ser caracterizado pela presença de vegetação rasteira (gramíneas) e por pequenos arbustos, encontrados com maior frequência nos povoamentos de 4,5 e 5,5 anos de idade (FIGURA 3).

3.2 LEVANTAMENTO DE CAMPO CONVENCIONAL

Para a realização desta pesquisa foram instaladas e mensuradas quatro unidades amostrais por idade e a intensidade amostral foi de uma unidade de 400 m² para cada 10 hectares (TABELA 2). A instalação das unidades amostrais circulares foi de forma aleatória em todas as idades. Após a demarcação da unidade amostral foram realizadas medições do CAP (Circunferência na altura do peito) com fita para fins de comparação com os dados obtidos com *laser*.

TABELA 2 - DADOS DAS UNIDADES AMOSTRAIS DE *Eucalyptus* spp.

Idade (anos)	Espécie	Parcela (Nº)	\overline{DAP} (cm)	$\overline{G/ha}$ (m ²)
2 s/d*	<i>Eucalyptus grandis</i>	1 a 4	10,64	9,95
2	<i>Eucalyptus urophylla</i>	5 a 8	11,54	11,85
4,5	<i>Eucalyptus urograndis</i>	9 a 12	15,08	22,61
5,5	<i>Eucalyptus urograndis</i>	13 a 16	17,39	22,03

*s/d: sem desrama.

Os diâmetros foram compilados e divididos em classes pela fórmula de *Sturges* (Equação 1) que é definida como o número **k** de intervalos para cada conjunto de observações com **n** valores. Após a divisão em classes, foi realizada a distribuição diamétrica por hectare para as idades analisadas.

$$k = 1 + 3,322(\log_{10} n) \quad (1)$$

3.3 VARREDURA LASER TERRESTRE

3.3.1 Equipamento *laser*

O equipamento (FIGURA 4) foi posicionado a uma altura de 1,7 metros do solo, no centro e em quatro pontos externos a unidade amostral.



FIGURA 4 - EQUIPAMENTO LASER TRIMBLE TX5.
FONTE: O autor (2015).

O campo de visão do equipamento é de 310° na vertical e 360° na horizontal (FIGURA 5). Dassot *et al.* (2011) comentaram que usando altas resoluções também aumenta a carga de dados e o tempo de processamento. Por exemplo, usando a resolução máxima do equipamento Trimble TX5, com um ponto a cada 2 mm a uma distância de 25 m leva-se cerca de 2 horas por varredura completa com um tamanho de arquivo de mais de 2 GB. Adotando a resolução de 1/2 (um ponto a cada 4 mm a uma distância de 25 m) ou 1/4 a resolução (um ponto a cada 8 mm a uma distância de 25 m) é satisfatório para obter excelentes atributos das árvores como o DAP.

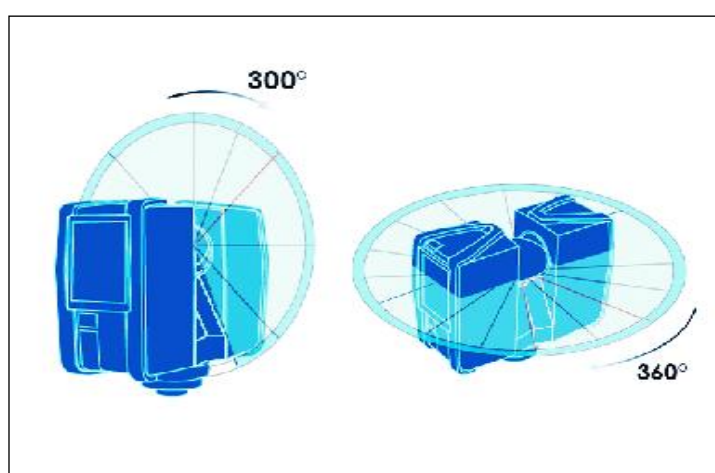


FIGURA 5 - TRIMBLE TX5 COM ÂNGULO MÁXIMO DE VISADA PARA A COLETA DE DADOS.

FONTE: TRIMBLE (2013).

A resolução da varredura com base na descrição de pesquisas anteriores foi fixada em $\frac{1}{4}$ (244.000 pontos por segundo), correspondendo a uma resolução angular de 0,036° e uma resolução espacial de 6,283 milímetros para uma distância de 10 m do dispositivo (TABELA 3).

TABELA 3 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO TRIMBLE TX5.

Especificações	Trimble TX5
Alcance de medição (m)	De 0,6 até 120
Acurácia de medição de distância até 25 metros (mm)	+ ou - 2
Diâmetro do feixe de saída (mm)	3 mm
Máxima resolução (o)	0,009 x 0,009

3.3.2 Varredura *laser*

Para determinar o número de varreduras necessário para a detecção de 100% das árvores, nos três tamanhos de unidades amostrais, a instalação do equipamento para coleta de dados *laser* foi realizada em cinco posições (FIGURA 6).

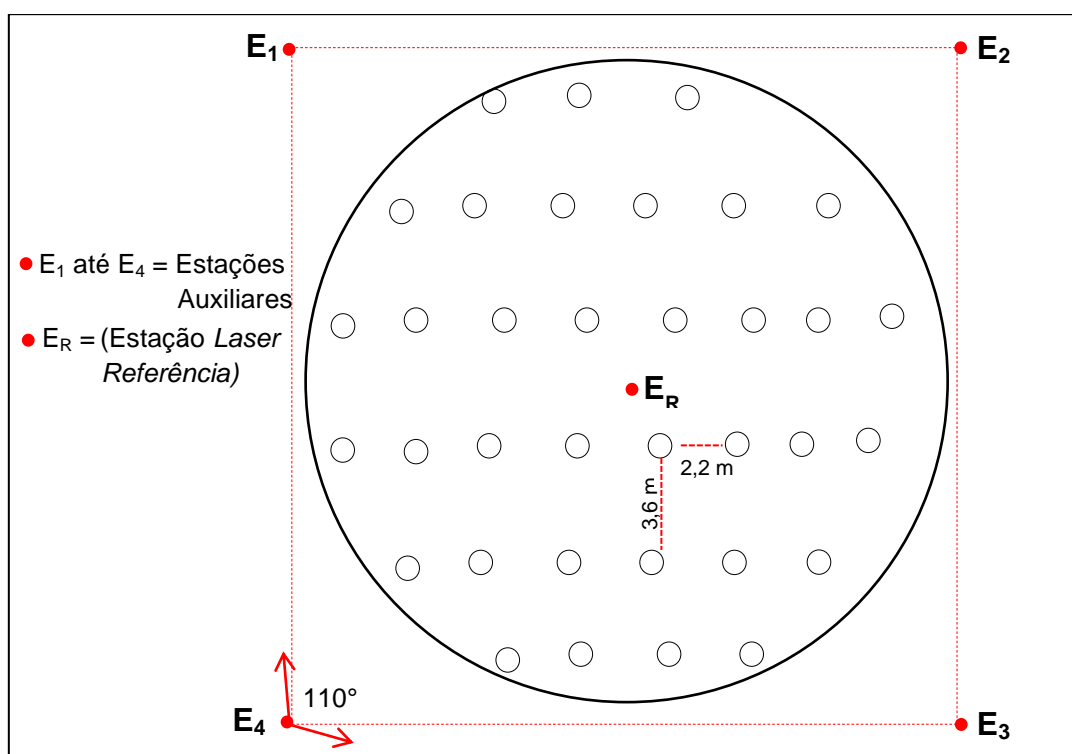


FIGURA 6 - OS CINCO POSICIONAMENTOS DO EQUIPAMENTO LASER UTILIZADOS PARA AS VARREDURAS EM UMA UNIDADE AMOSTRAL
FONTE: O autor (2015).

O planejamento do posicionamento do equipamento foi realizado com base na orientação das linhas de plantio (menor espaçamento entre árvores). Para tal, delimitou-se um quadrilátero que compreende a unidade amostral, onde dois lados estão paralelos (E₁ - E₂ e E₃ - E₄) às linhas de plantio e dois lados perpendiculares (E₁ - E₄ e E₂ - E₃) (FIGURA 6). As posições do equipamento definidas no campo para realizar as varreduras auxiliares estão alocadas externamente ao perímetro da unidade amostral.

O equipamento foi posicionado em quatro pontos auxiliares à unidade amostral (E_1 até E_4), mais um posicionamento no centro (E_R). A varredura na posição central (E_R) foi realizada com um giro de 360° , e nas posições E_1 até E_4 , foram obtidas com um ângulo de 110° , assumindo a direção do ponto E_R como bissetriz do ângulo. As visadas com 110° de abertura foram adotadas como margem de segurança para alcançar o recobrimento de todas as árvores de borda.

Os arranjos de posicionamento do *laser* foram testados a partir de varreduras simples e múltiplas (duas e três varreduras). Para a varredura simples, foi testada a estação E_R . Para as varreduras duplas foram considerados os posicionamentos do equipamento referência (E_R) e um externo (E_2 , por exemplo), varreduras opostas ($E_1 - E_3$ ou $E_2 - E_4$), paralelas à linha de plantio ($E_1 - E_2$ ou $E_3 - E_4$) e perpendiculares à linha de plantio ($E_1 - E_4$ ou $E_2 - E_3$). Para os arranjos de três posicionamentos do equipamento foram testadas a estação E_R e opostas ($E_1 - E_3$ ou $E_2 - E_4$) e E_R e perpendiculares ($E_1 - E_4$ ou $E_2 - E_3$). Cabe ressaltar que em duas unidades amostrais nas idades de 2 anos, foram realizadas somente as varreduras (E_R , E_1 e E_3), sendo assim não foi possível testar o arranjo de varreduras “paralelas” e “perpendiculares”.

O tempo de coleta dos dados com o equipamento *laser*, não muda em relação ao tamanho da unidade amostral. O tempo de varredura é de aproximadamente 9 minutos para a varredura em 360° e 4,5 minutos para a varredura de 110° , com uma resolução do equipamento de $1/4$. Dessa maneira, o tempo total para realizar o levantamento de uma unidade amostral foi em média, de 32 minutos, utilizando as cinco posições do equipamento, porém nesta pesquisa foram testados até três posicionamentos. Segundo Pueschel *et al.* (2013), para que a varredura seja operacional não deve exceder ao tempo de 30 minutos.

3.4 REGISTRO DAS NUENS DE PONTOS PARA VARREDURAS MÚLTIPLAS

Os alvos (FIGURA 7) são indispensáveis para o registro das nuvens de pontos provenientes de varreduras múltiplas. Sendo assim, foram instalados em cada U.A. cinco alvos esféricos com diâmetro de 147 mm. Os alvos foram colocados em tripés a diferentes alturas e sua distribuição espacial foi realizada, de tal forma, que sejam detectados em todas as varreduras para a realização do registro.



FIGURA 7 - ALVOS ALOCADOS PARA O REGISTRO DA NUVEM DE PONTOS.
FONTE: O autor (2015).

O registro das nuvens de pontos é necessário, quando se estabelece mais de um posicionamento de uma mesma cena permitindo integrar as varreduras em um único arquivo, gerando uma cobertura maior de pontos nas árvores, diminuindo assim o efeito de sombreamento e melhora substancialmente a qualidade dos dados (YAO *et al.*, 2011 e ZHAO *et al.*, 2011).

A acurácia na operação de registro pode ser influenciada pelo tamanho da área, da altura das árvores, ocorrência de vento e a presença de sub-bosque, (CIFUENTES *et al.*, 2014). Outro fator relevante a ser considerado, além da distribuição dos alvos é a influência de vento durante a varredura, caso isso ocorra é necessária a interrupção da varredura. Para diminuir ou evitar o efeito de sombreamento das árvores, são necessárias diferentes posições de varredura. Cada varredura adota um sistema local próprio de coordenadas. Para uma análise destes dados em conjunto, faz-se necessária a transformação de todos os sistemas de coordenadas locais em um sistema único de coordenadas (MAAS *et al.*, 2008).

O registro da nuvem de pontos é baseado na transformação de *Helmert* com três translações e três rotações (sendo o parâmetro m um fator de escala fixo fornecido pela varredura *laser* de valor igual a 1). Para o ajuste das coordenadas com sistema de referência comum (coordenadas locais), são necessários no mínimo 3 pontos de apoio visíveis (*tie points*) para que a equação de registro possa ser

ajustada (Equação 2) (BIENERT e MAAS, 2009; WEZYK, *et al.*, 2012 e BIENERT, *et al.*, 2014).

$$\begin{bmatrix} \underline{X} \\ \underline{Y} \\ \underline{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + mR \begin{bmatrix} \overline{X_n} \\ \overline{Y_n} \\ \overline{Z_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Em que:

$\underline{X}; \underline{Y}; \underline{Z}$ = vetor inicial.

$X_0; Y_0; Z_0$ = vetores de translação (m);

m = fator de escala (igual a 1);

R = matriz de rotação (radianos);

$\overline{X_n}; \overline{Y_n}; \overline{Z_n}$ = vetor final.

Inicialmente foi realizada a leitura da nuvem de pontos das cinco varreduras de cada U.A. para a detecção dos alvos (147 mm) de forma semiautomática (FIGURA 8A). O algoritmo busca e identifica automaticamente na nuvem de pontos o formato do alvo esférico. O Algoritmo pode incluir outros objetos com formato próximo ao dos alvos. Desta forma, é necessário marcar manualmente na cena, os objetos que correspondem aos alvos (FIGURA 8B) para proceder com a operação de registro. Após a operação de registro, os arquivos são exportados em formato *pts para realizar o processamento dos dados *laser*.

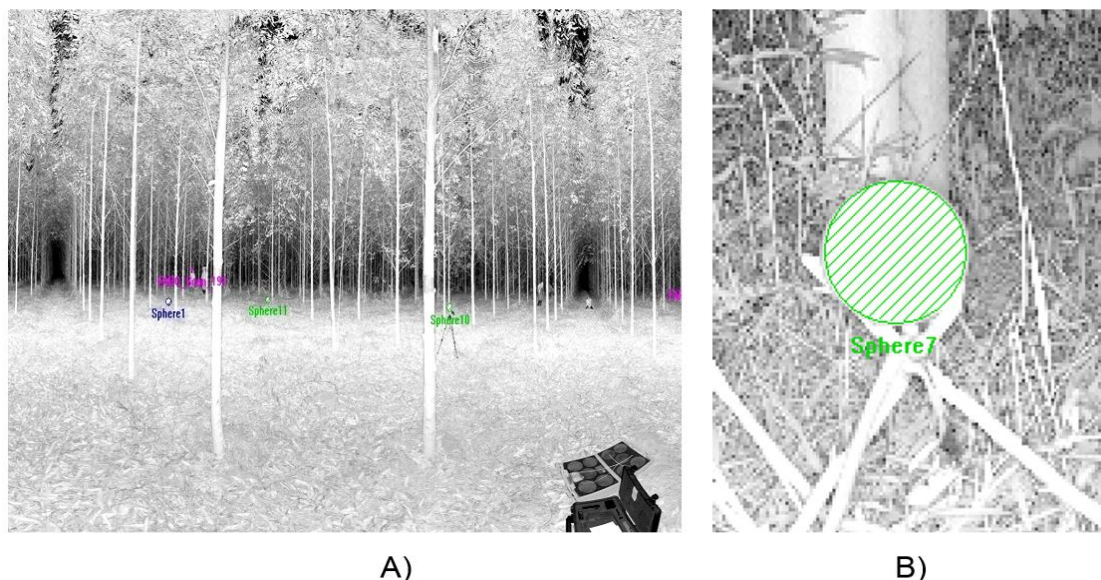


FIGURA 8 - A) VISTA PLANAR DA NUVEM DE PONTOS. B) ALVO IDENTIFICADO NA NUVEM DE PONTOS.
 FONTE: O autor (2015).

3.5 ALGORITMO DE DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE ÁRVORES

O agrupamento de pontos que representam uma árvore tem a forma de uma semicircunferência ou circunferência, para varreduras simples e múltiplas respectivamente. A presença de um agrupamento de pontos formando uma semicircunferência ou circunferência até a distância máxima de 1,50 metros foi adotado como critério para detecção das árvores. A FIGURA 9 apresenta as etapas de processamento, para a detecção das árvores.

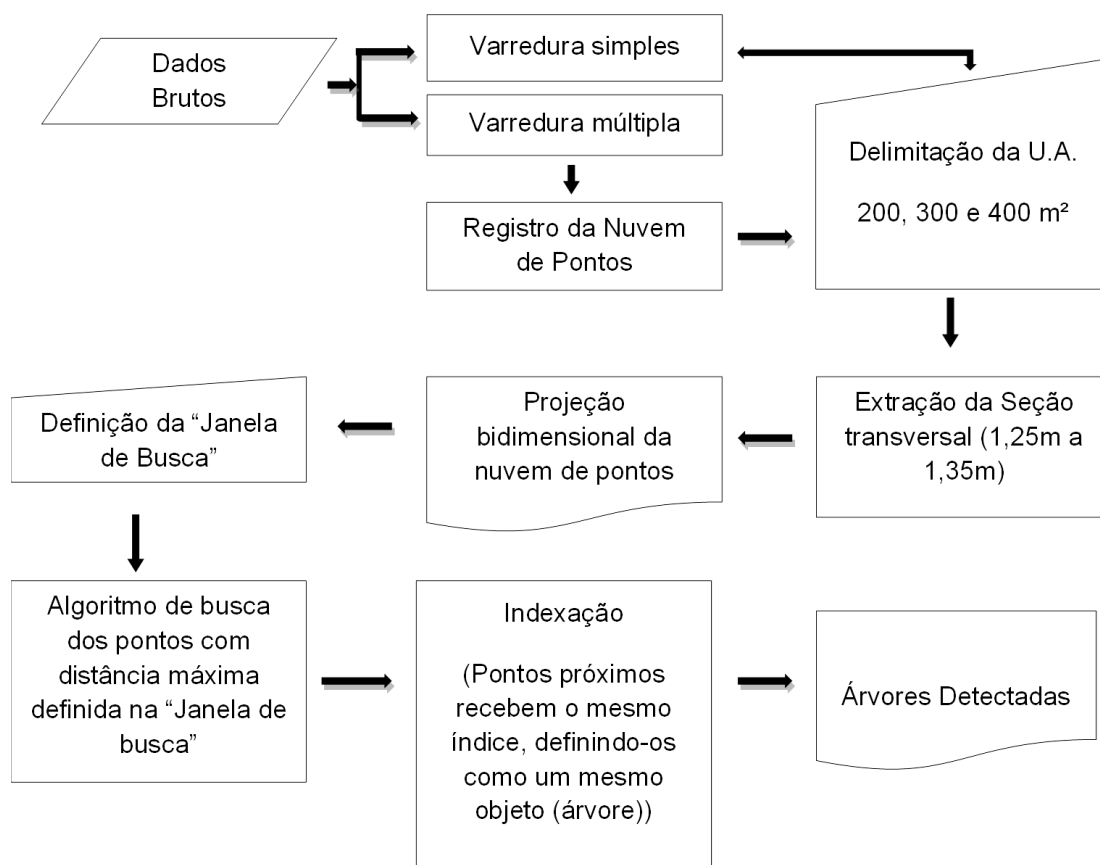


FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE PROCESSAMENTO DOS DADOS LASER PARA DETECÇÃO AUTOMÁTICA DAS ÁRVORES.
FONTE: O autor (2015).

O algoritmo pode ser descrito como (APÊNDICE 1):

- Delimitação da unidade amostral: Recorte da nuvem de pontos (Raio = 7,98 m, 9,77 m e 11,28 m) (FIGURA 6).
- Recorte da seção transversal entre 1,25 - 1,35 m.
- Ponto inicial do processamento para o algoritmo de detecção automática = X_0 , Y_0 .
- Região de busca de agrupamento de pontos, $[X_0 - X_{min}, Y_0 - Y_{min}]$ a $[X_0 + X_{min}, Y_0 + Y_{min}]$, em que $X_{min} = Y_{min} = 1,5$ metros.

A etapa inicial do processamento refere-se ao recorte das unidades amostrais (FIGURA 10) por meio de um algoritmo que inicia uma busca ponto a ponto ($p(i), i = 1, \dots, n$) comparando se o resultado da distância euclidiana (d_e) entre um ponto (X_i, Y_i) e o centro da nuvem de pontos (X_c, Y_c) está dentro do limiar estabelecido para o

raio da unidade amostral (R_p). Se a condição $d_e \leq R_p$ for verdadeira o ponto é indexado e armazenado para a geração da nuvem de pontos da unidade amostral.

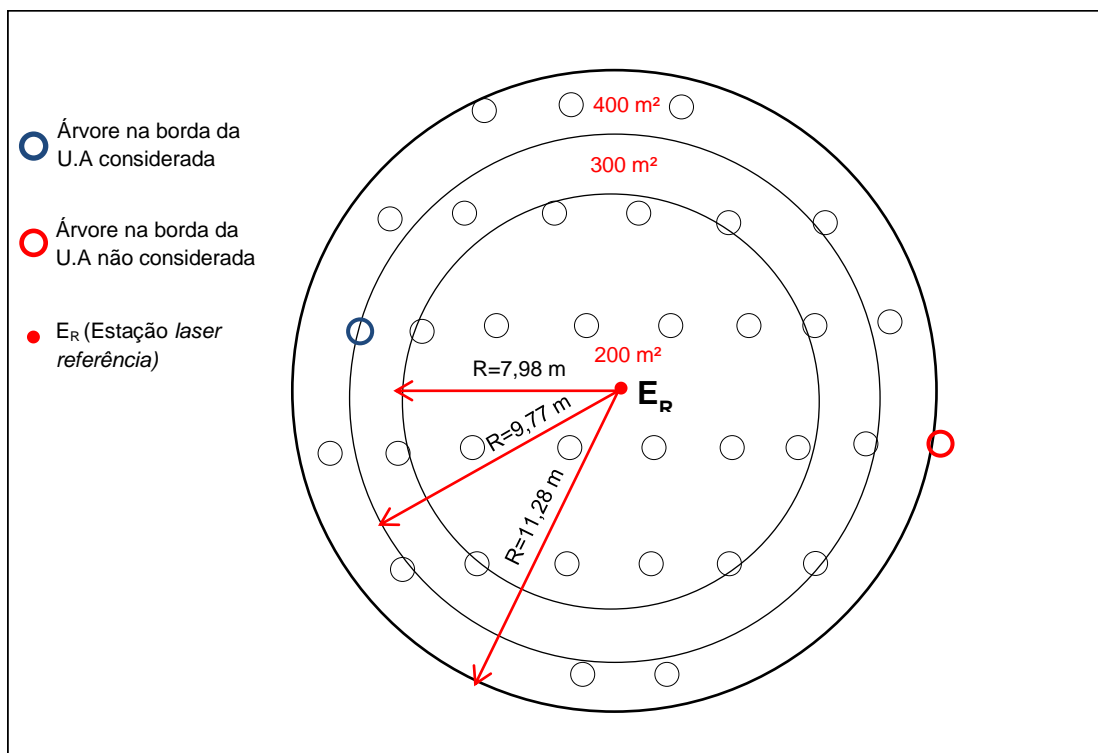


FIGURA 10 - DELIMITAÇÃO DOS TRÊS TAMANHOS DE UNIDADES AMOSTRAIS PARA A DETECÇÃO AUTOMÁTICA.
FONTE: O autor (2015).

A borda ou o limite da unidade amostral pode eventualmente estar sobre uma árvore (FIGURA 10). Neste caso, o valor de recorte dos dados *laser* para delimitação dos diferentes tamanhos das unidades amostrais pode ser exatamente nas árvores do limite, sendo assim, como no método tradicional de inventário florestal, deve-se incluir a árvore quando esta encontrar-se com no mínimo meio diâmetro dentro do limite da unidade amostral.

Após a operação de delimitação das unidades amostrais, foram extraídas das nuvens de pontos seções transversais com espessura de 10 cm na altura do DAP (FIGURA 11) e projetados em um plano cartesiano bidimensional (X e Y) (MAAS *et al.*, 2008).

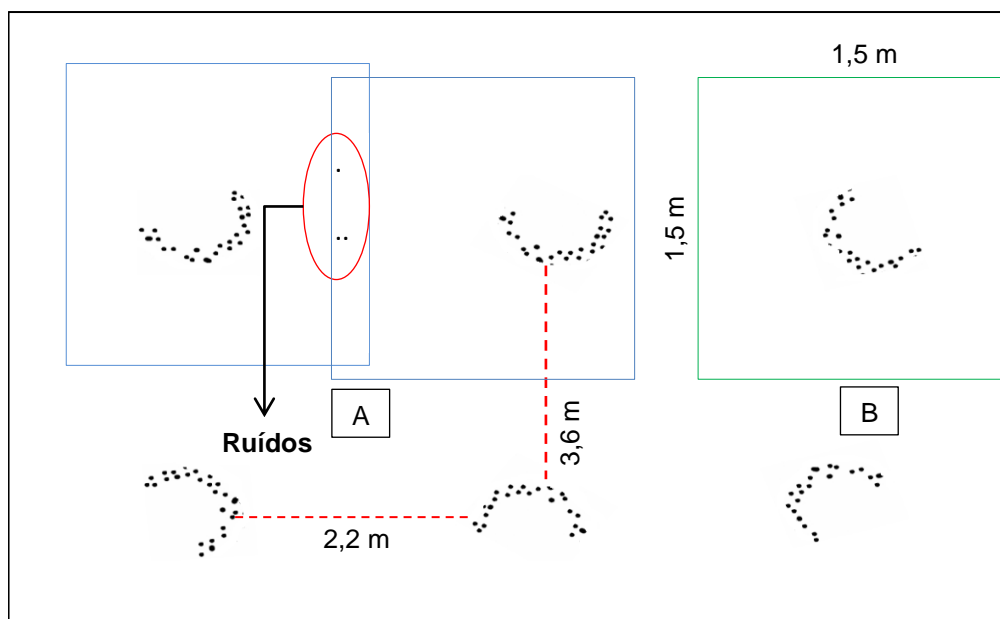


FIGURA 11 - RECORTE TRANSVERSAL DA NUVEM DE PONTOS A 1,3 m. A) INDEXAÇÃO DE DUAS SEÇÕES TRANSVERSAIS E B) DETECÇÃO CORRETA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DEVIDO À AUSÊNCIA DE RUÍDOS ENTRE DUAS SEÇÕES COMO GALHOS OU SUB-BOSQUE.
FONTE: O Autor (2015).

A detecção de árvores se baseia no pressuposto que as maiores densidades de pontos estão localizadas nos troncos das árvores com distância mínima de 1,5 metros, sendo esta a condição para considerar o objeto como árvore.

O princípio para busca das seções transversais é a partir de uma “janela de busca” com tamanho de 1,50 por 1,50 m, que está relacionada com o espaçamento do plantio, que é de 2,2 x 3,6 metros. Sendo assim a menor distância entre as árvores é de 2,2 metros, de tal forma que o tamanho da janela de busca deve ser menor que a distancia entre as árvores.

Caso a nuvem de pontos recortada com espessura de 10 cm apresente ruídos (FIGURA 11A, destacado em vermelho), como por exemplo, casca, galhos ou sub-bosque, podem gerar erros de detecção, pois serão indexadas em conjunto com as seções transversais, ou ainda podendo ocasionar subestimativa ou superestimativa de número de árvores na unidade amostral.

A janela que contém mais pontos tem maior probabilidade de corresponder a árvores. Se estiverem reunidas as condições, as coordenadas X e Y de cada árvore serão gravados num arquivo de saída e o número de árvores é contabilizado.

Para a detecção automática das árvores foi observada a quantidade de árvores em pé que podem ser reconhecidas, a partir da combinação de uma, duas ou três varreduras. Neste caso, as árvores detectadas pelo algoritmo a partir de dados TLS foram quantificadas e os resultados foram comparados com o número de árvores observadas nas unidades amostrais pelo inventário convencional.

3.6 DETERMINAÇÃO DE DIÂMETROS *versus* NÚMERO DE VARREDURAS

O método consiste na leitura dos dados da seção transversal e determinação das coordenadas X_{\min} e X_{\max} , Y_{\min} e Y_{\max} . A partir da leitura dos pontos, o algoritmo de distância máxima tem como princípio encontrar dois pontos em que a distância euclidiana no plano (X, Y) é máxima para uma seção transversal a uma dada altura da árvore com uma espessura “n” que proporcione uma quantidade de pontos suficientes para representar uma seção transversal (FIGURA 12). O algoritmo visa determinar o diâmetro próximo ao maior valor de diâmetro quando mensurado com uma suta.

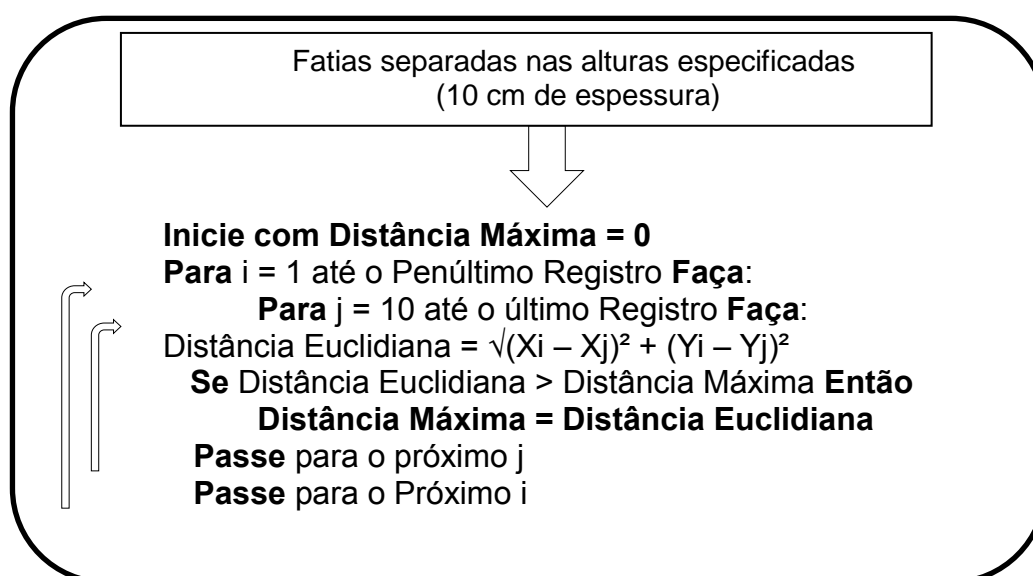


FIGURA 12 - ALGORITMO PARA O CÁLCULO DO DIÂMETRO EM UMA SEÇÃO TRANSVERSAL.
 FONTE: Silva (2011).

A espessura da seção transversal adotada neste estudo foi de 10 cm. A maior distância planimétrica entre as distâncias " $X_{\max} - X_{\min}$ " e " $Y_{\max} - Y_{\min}$ " é escolhida como primeira aproximação do diâmetro. A seguir, avalia-se a distância de todos os pontos da seção analisada com relação a X_{\max} e Y_{\max} , substituindo-se a distância tomada como referência sempre que uma distância maior for encontrada. Ao final, a distância entre os pontos mais afastados é adotada como diâmetro da seção transversal (SILVA, 2011).

Este algoritmo foi escolhido pelo fato de que Silva (2011) em sua pesquisa explica que o método da Distância Máxima apresenta bons resultados na determinação dos diâmetros a 1,3 m em dados de varreduras simples e múltiplas. O método geralmente apresenta superestimativa, pois determina o diâmetro pela maior distância entre os pontos da seção, porém nesta pesquisa este fator é amenizado, pois as seções transversais de *Eucalyptus* spp são mais circulares, ou seja, não apresentam maiores variações de diâmetro.

Para a determinação do diâmetro pelo algoritmo de distância máxima, todas as árvores detectadas foram isoladas da nuvem de pontos considerando as varreduras simples e múltiplas (duplas e triplas) (FIGURA 13), e o tamanho das unidades amostrais, pois dependendo do sentido da visada do equipamento, a mesma seção transversal pode conter mais ou menos pontos, interferindo na determinação do diâmetro pelo algoritmo.

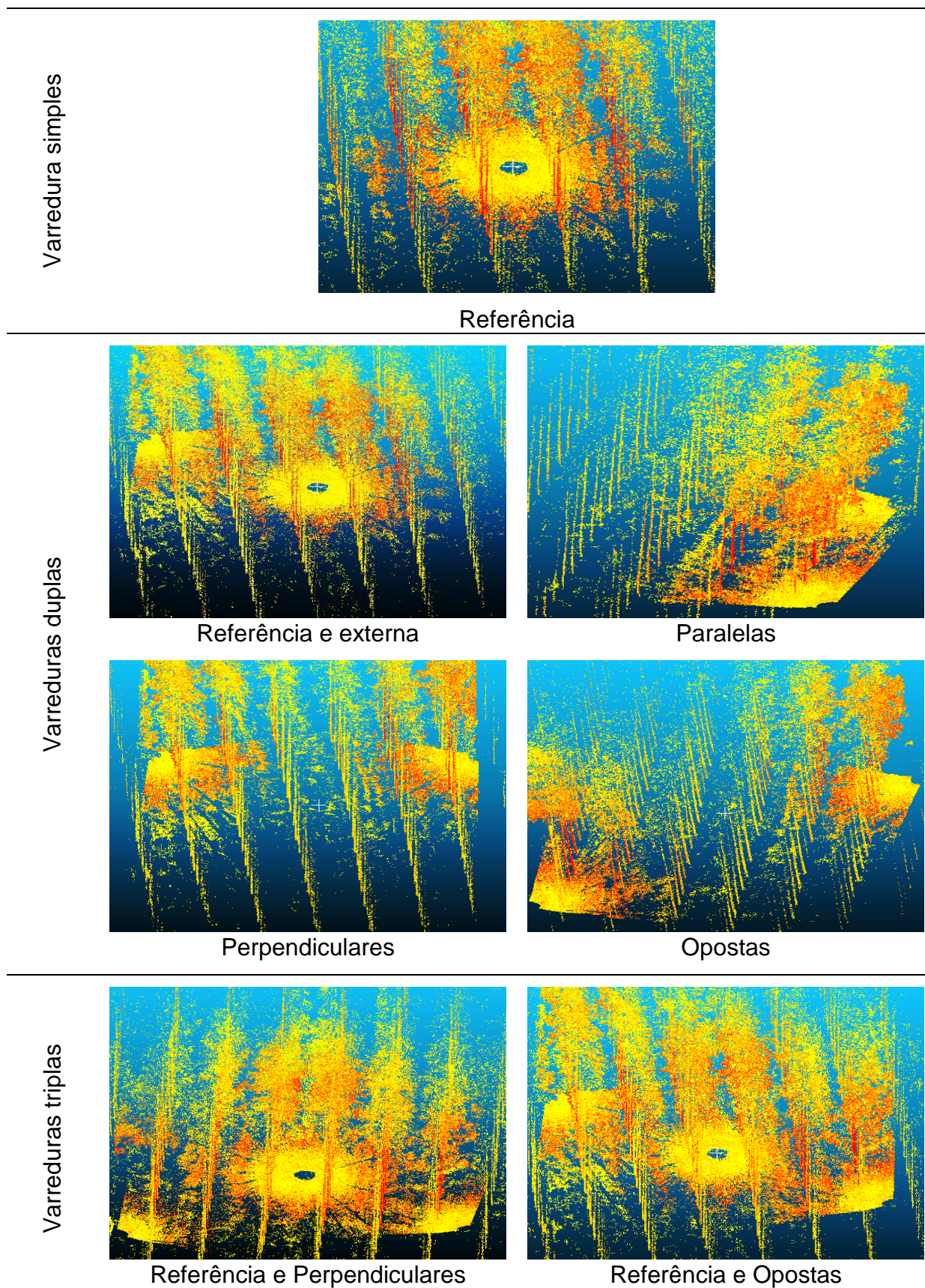


FIGURA 13 - VARREDURA SIMPLES E COMBINAÇÕES DE VARREDURAS DUPLAS E TRIPLAS VERSUS POSIÇÃO DO EQUIPAMENTO.
 FONTE: O Autor (2015).

Após a determinação dos diâmetros pelo algoritmo, fez-se uma correlação com os diâmetros obtidos pelo método convencional, onde foi calculado o diâmetro médio em cada idade para os três tamanhos de unidades amostrais (200, 300 e 400 m²), sendo comparados com os posicionamentos do equipamento para verificar se existem diferenças estatísticas.

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística foi dividida em duas etapas, sendo a primeira a comparação entre o número de árvores obtido em campo e por meio do algoritmo de detecção automática pelo método L&O, e a segunda, refere-se à comparação entre os diâmetros obtidos convencionalmente, e àqueles determinados pelo algoritmo de distância máxima, considerando os diferentes tamanhos de unidades amostrais e o posicionamento do equipamento *laser*, utilizando o delineamento inteiramente casualizado com arranjo fatorial.

3.7.1 Teste L&O para número de árvores

Para a comparação entre o número de árvores obtidos no campo e pelo algoritmo de detecção automática com as diferentes combinações de posicionamento do equipamento e número de varreduras, utilizou-se o teste de identidade L&O proposto por Leite e Oliveira (2002), cujo procedimento resulta da combinação do teste F (FH0) de Graybill (Equação 3), e do teste *t* (*tē*) e da análise de correlação linear (*r_{yjy1}*), entre os valores observados (*Y_j*) e os valores estimados (*Y₁*). O teste compara o valor observado como variável dependente e o valor estimado como variável independente.

$$F(H_0) = \frac{(\beta - \theta)(Y_1 - Y_1)(\beta - \theta)}{2 RMS} \sim F_{\alpha(2, n-2, g.l.)}$$

Onde:

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \end{bmatrix} = \text{Vetor de coeficientes da equação de regressão.}$$

$$\theta = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}; (X'X)^{-1} = \begin{bmatrix} n & \sum x \\ \sum x & \sum x^2 \end{bmatrix}^{-1};$$

$$F_{tab} = [5\%; 2, n - 2 \text{ gl}].$$

As regras de decisão para a comparação do número de árvores observado em campo com o determinado pelo algoritmo são apresentadas na TABELA 4, sendo que o nível de significância adotado foi 1%.

TABELA 4 - REGRA DE DECISÃO PARA COMPARAÇÃO.

Regra	(FH ₀)	t _e	r _{yjy1}	Decisão
1	ns	Ns	r ≥ (1 - ē)	Y _J =Y ₁
2	ns	Ns	r ≤ (1 - ē)	Y _J ≠Y ₁
3	ns	*	r ≥ (1 - ē)	Y _J ≠Y ₁
4	ns	*	r ≤ (1 - ē)	Y _J ≠Y ₁
5	*	Ns	r ≥ (1 - ē)	Y _J ≠Y ₁
6	*	Ns	r ≤ (1 - ē)	Y _J ≠Y ₁
7	*	*	r ≥ (1 - ē)	Y _J ≠Y ₁
8	*	*	r ≤ (1 - ē)	Y _J ≠Y ₁

ns e * denotam, respectivamente, não significativo e significativo ao nível de α de probabilidade.

FONTE: LEITE E OLIVEIRA (2002).

Quando o erro médio não é significativo, é também necessário que o valor da correlação do coeficiente seja mais alto que (1 - |ē|) e que F(H₀) seja não significativo. A regra 5 (TABELA 4) pode ser aceitável em alguns casos, principalmente quando o quadrado médio do resíduo (QM_{res}) é muito pequeno. Neste caso, o valor de F(H₀) tende a ser alto, resultando em significativo. Isto ocorre

quando os resultados dos dois métodos são próximos. Neste caso, uma pequena diferença pode tornar o teste F significativo (LEITE e OLIVEIRA, 2002).

Para os arranjos de varredura onde foram detectadas 100% das árvores, não foi aplicado o teste estatístico, pois os valores obtidos no campo (Y_j) são análogos aos valores obtidos pelo algoritmo (Y_1).

3.7.2 Delineamento experimental para determinação dos diâmetros

A comparação entre os diâmetros obtidos a campo e determinados pelo algoritmo, foi analisada por meio do teste de Bartlett, com o objetivo de verificar se as variâncias são homogêneas. A aplicação do teste resulta em um valor de χ^2 (qui-quadrado) que, posteriormente, é comparado com o valor tabelado. Quando o valor obtido é menor ou igual ao valor da tabela, conclui-se que as variâncias são homogêneas, podendo ser aplicada a análise estatística paramétrica.

A partir do teste de *Bartlett*, procedeu-se a análise de variância pelo delineamento experimental inteiramente casualizado com arranjo fatorial (TABELA 5). O fator A, corresponde às sete combinações de varreduras, considerando os diâmetros médios obtidos pelo algoritmo, mais a testemunha que são os diâmetros médios de cada unidade amostral mensurados no campo. O fator B são os tamanhos das unidades amostrais, sendo eles, 200, 300 e 400 m² totalizando quatro unidades amostrais por idade.

TABELA 5 - ARRANJO FATORIAL, PARA A ANÁLISE DA VARIÂNCIA.

Varreduras	FATOR A	FATOR B
Simplex	Referência	
Duplas	Referência e externa	
	Paralelas	200 m ²
	Perpendiculares	300 m ²
	Opostas	400 m ²
Triplas	Referência e perpendiculares	
	Referência e opostas	

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, serão apresentados os resultados sobre a distribuição diamétrica obtida em campo, mostrando a frequência de diâmetros por classe, para as quatro idades de plantio. O registro das varreduras, e considerações sobre a delimitação dos diferentes tamanhos de unidades amostrais adotadas para varreduras simples e múltipla. Aplicação do algoritmo de detecção automática de árvores para varreduras simples, duplas e triplas avaliando a influência dos posicionamentos do equipamento para realização da varredura, em função do tamanho de unidades amostrais e por fim a comparação dos diâmetros obtidos convencionalmente e pelo algoritmo de distância máxima nos diferentes tamanhos de unidades amostrais e combinações de varredura.

4.1 DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA

A idade de 2 anos (*E. grandis*) teve uma tendência para a distribuição normal com maior frequência de número de árvores no centro de classe de 11 cm (FIGURA 14A). Na idade de 2 anos (*E. urophylla*), a maior frequência do número de árvores se concentrou na classe de 11 e 13 cm (FIGURA 14B). Para as idades de 4,5 e 5,5 (FIGURA 14C e 14D), a frequência do número de árvores ocorreu nos maiores diâmetros nos centros de classes de 17 e 19 cm, respectivamente.

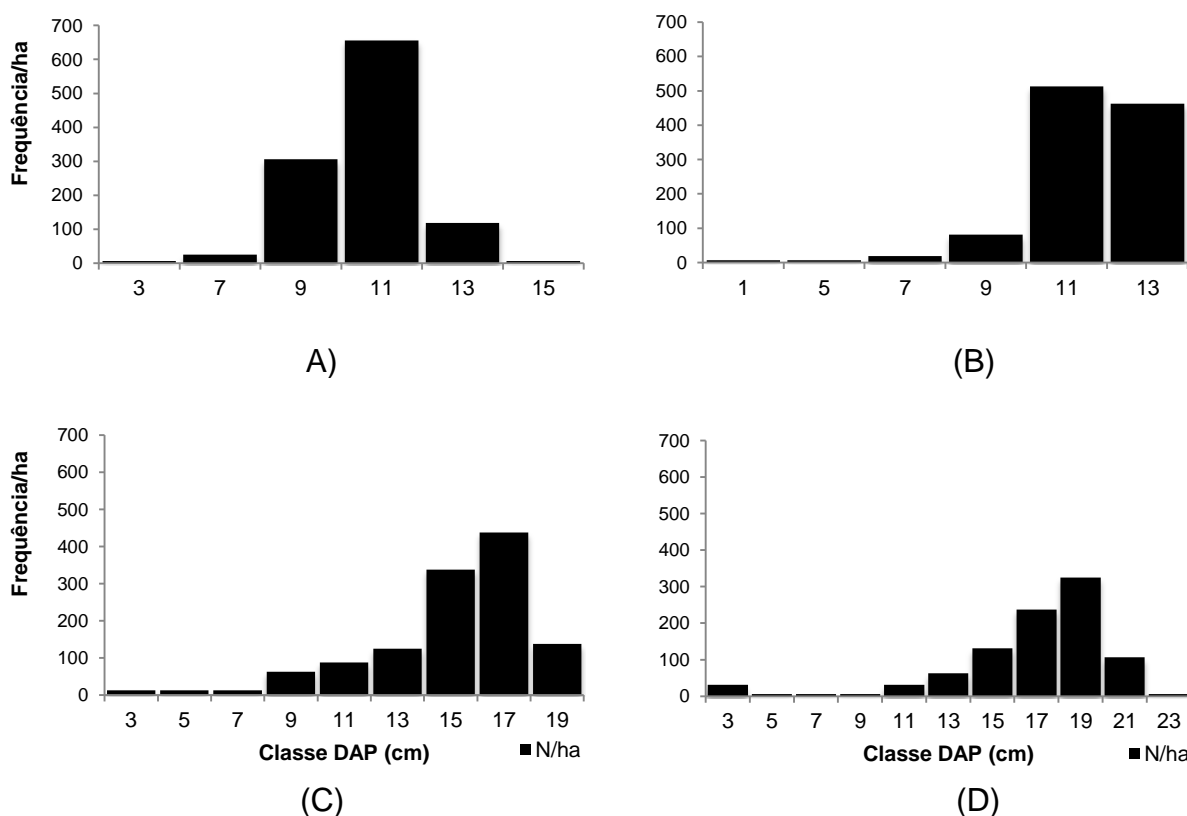


FIGURA 14 - DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA NAS IDADES: A) 2 ANOS (*E. grandis*) SEM DESRAMA NATURAL; B) 2 ANOS (*E. urophylla*); C) 4,5 ANOS (*E. urograndis*); D) 5,5 ANOS (*E. urograndis*).

FONTE: O Autor (2015).

Ao longo do tempo, as distribuições diamétricas achatam-se e deslocam-se para a direita, sendo esse o comportamento natural da distribuição diamétrica em povoamentos equiâneos (LEITE *et al.*, 2005). Outro fator é a capacidade produtiva de um local e por se tratar de povoamentos clonais, aumenta a taxa de crescimento das árvores; sendo assim, quanto maior a taxa, mais cedo o povoamento inicia o processo de competição entre elas, o que resulta na estagnação do crescimento.

A tendência para a maior frequência de árvores nos maiores diâmetros (FIGURA 14) é análogo a povoamentos submetidos a regime de desbaste. Segundo Nogueira *et al.*, (2005) ajustando a distribuição *Weibull*, em povoamentos híbridos de *E. urograndis* com espaçamento de 3,0 x 3,0 metros, a distribuição diamétrica apresentou resultados similares a esta presente pesquisa, com maior frequência de número de árvores nas maiores classes. Outro fato que deve ser levado em consideração é que não foi realizado o ajuste de distribuição de diâmetros, sendo

realizado somente sobre os diâmetros medidos nas quatro unidades amostrais em cada idade, e extrapolados por hectare.

4.2 REGISTRO

A resolução da varredura *laser* foi de $0,036^\circ$ e o erro de ajuste das nuvens de pontos para todas as unidades amostrais foram abaixo da resolução de varredura, sendo assim o registro foi satisfatório em todas as unidades amostrais (Apêndice 2).

Em contrapartida, foram detectados erros no processo de registro através da análise visual qualitativa, principalmente devido à ocorrência de vento (FIGURA 15) no momento da varredura, e também ao arranjo dos alvos por estarem posicionados a uma altura máxima de 3 metros, ocasionando erros nas partes mais altas das árvores. Em geral, os alvos usados para o registro da nuvem de pontos devem ser localizados dentro de 15 metros a partir do equipamento para garantir que haja pontos *laser* suficientes sobre a superfície do alvo (MASS *et al.*, 2008).

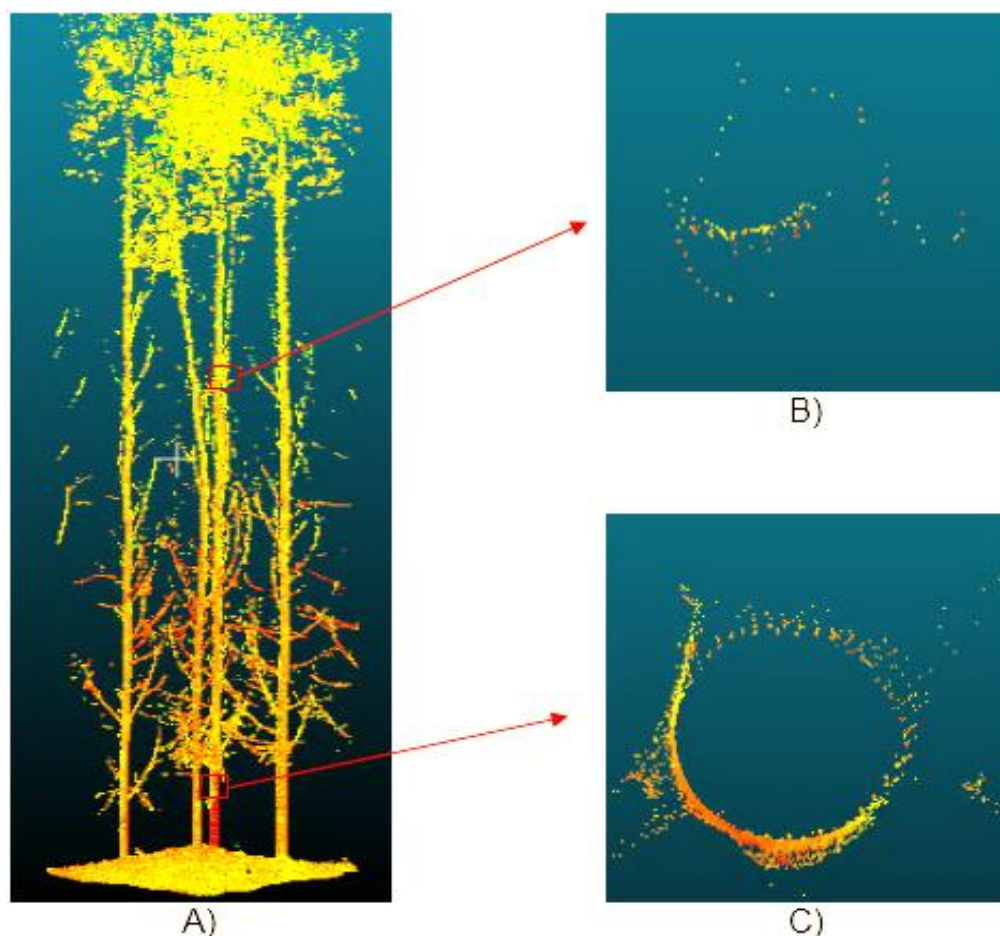


FIGURA 15 - A) NUVEM DE PONTOS REGISTRADA. B) SEÇÃO TRANSVERSAL A UMA ALTURA DE 12 m. C) SEÇÃO TRANSVERSAL A UMA ALTURA DE 1,3 m. FONTE: O autor (2015).

Fatores semelhantes aos encontrados nesta pesquisa são relatados por Côté *et al.* (2011). A disposição dos dados apresenta claramente que a medição *laser* na parte mais alta da árvore (FIGURA 15B) foi comprometida pela ação do vento deslocando o eixo vertical que está perpendicular ao plano da base do terreno, porém, quando se faz uma análise sobre o tronco mais próximo ao solo (FIGURA 15C), este fator é atenuado. O desvio vertical, não afeta a detecção de árvores, mas caso o objetivo fosse a modelagem do tronco, certamente seria um problema.

4.3 DELIMITAÇÃO DA UNIDADE AMOSTRAL

Como resultado da delimitação, foi obtida uma área circular referente ao tamanho da unidade amostral (FIGURA 16).

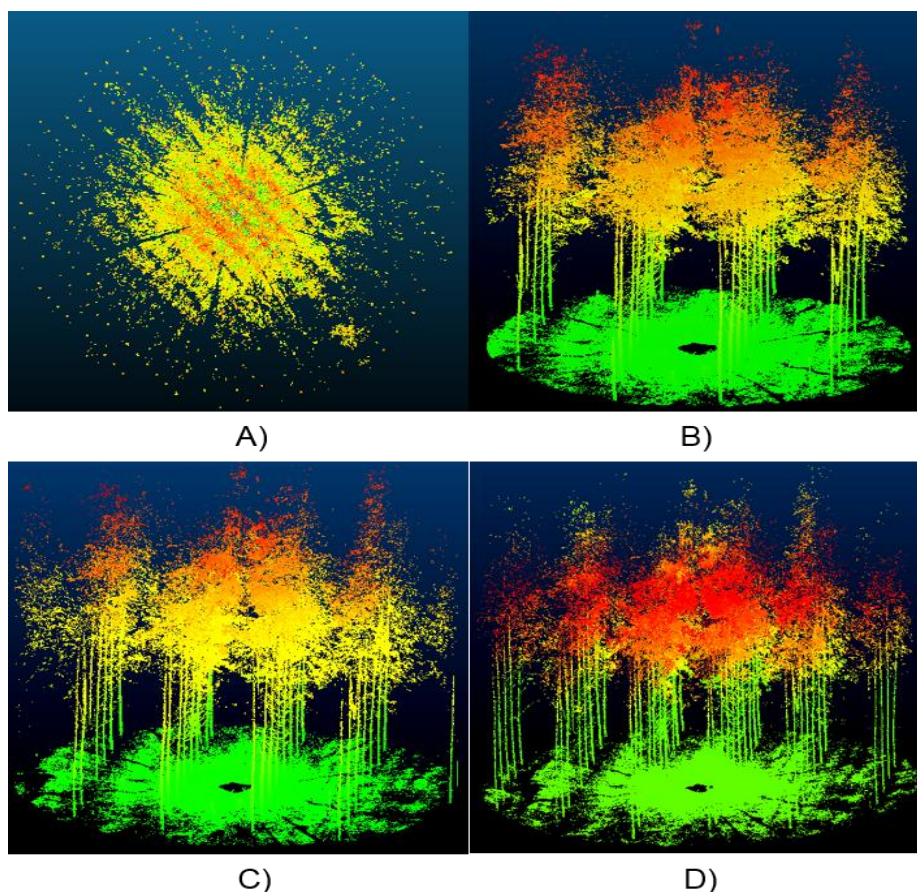


FIGURA 16 - VARREDURA SIMPLES EM UMA UNIDADE AMOSTRAL. A) VISUALIZAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS NO PLANO; B) 200 m²; C) 300 m²; D) 400 m².

FONTE: O autor (2015).

Os dados brutos de uma varredura simples apresenta maior densidade de pontos próxima ao centro da varredura (FIGURA 16A), ou seja, à medida que aumenta a distância das árvores para o equipamento, a quantidade de pontos observados é menor. Nas unidades amostrais de 200 e 300 m² (FIGURA 16B e 16C), os pontos *laser* que chegam até as árvores da borda não são influenciados pela resolução da varredura, não alterando a densidade de pontos. Porém, em unidades amostrais de 400 m² (FIGURA 16D), as árvores da borda contêm menos

pontos devido à resolução de varredura (um ponto *laser* a cada 6 mm, para uma distância de 10 m do equipamento). Para distâncias acima de 11,28 m, será necessária uma análise sobre a resolução do equipamento para realização da varredura simples, pois para varreduras múltiplas há uma sobreposição de pontos *laser* na cena. Podemos analisar que as unidades de 200 e 300 m² têm o mesmo número de linhas de plantio (FIGURA 16B e 16C) devido ao espaçamento, porém o número de árvores médio para 300 m² tem um acréscimo de 33%. Para 400 m² (FIGURA 16D) pode-se verificar que há a inclusão de duas linhas.

As árvores de borda podem eventualmente estar sobre o limite da unidade amostral, quando é realizada a delimitação da nuvem de pontos (FIGURA 17). Neste caso, como no inventário convencional, se a metade da seção transversal estiver dentro da área da unidade amostral, considera-se como pertencente à amostra. O erro de inclusão/exclusão de uma árvore em unidades amostrais de 200, 300 e 400 m² pode gerar sub ou superestimativa de 50, 33 e 25 árvores/ha⁻¹ respectivamente.

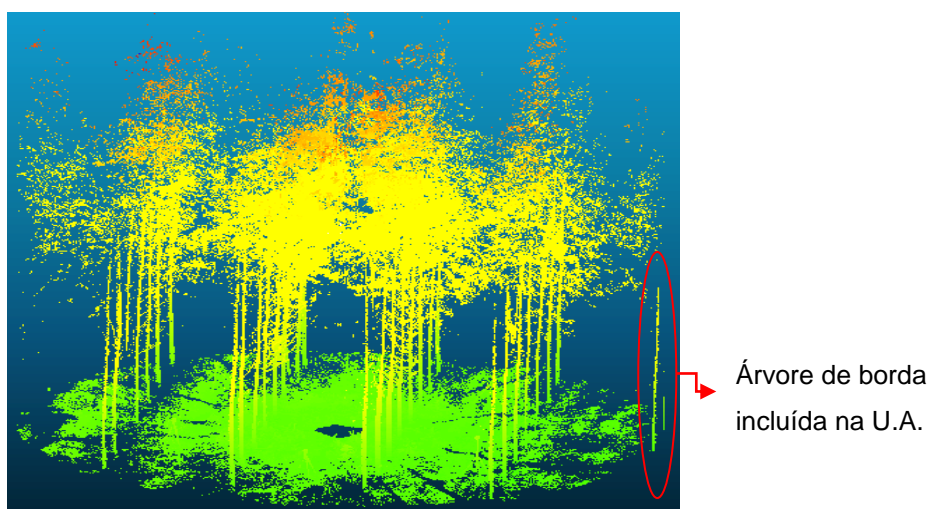


FIGURA 17 - DELIMITAÇÃO DE UMA UNIDADE AMOSTRAL DE 300 m² INDICANDO UMA ÁRVORE NO LIMITE.

FONTE: O autor 2015.

4.4 AVALIAÇÃO DO POSICIONAMENTO DO EQUIPAMENTO *versus* TAMANHO DA UNIDADE AMOSTRAL PARA DETECÇÃO DE ÁRVORES

4.4.1 Varredura simples

O teste para detecção de árvores com a varredura referência (E_R) (FIGURA 18A) foi escolhido pelo fato de que as árvores mais distantes do equipamento estão a 11,28 m (400 m^2). Caso fosse adotada qualquer estação auxiliar, as árvores mais distantes estariam a aproximadamente 28 metros, chegando menos pontos ao tronco e possivelmente haveria mais sombreamento. Assim, a resolução de varredura adotada fica garantida até a distância de 10 metros do equipamento, e com isso, as árvores da borda apresentam uma densidade de pontos menor (FIGURA 18C). As seções transversais quanto mais próximas do equipamento *laser* (FIGURA 18B) apresentam-se na forma de um semicírculo.

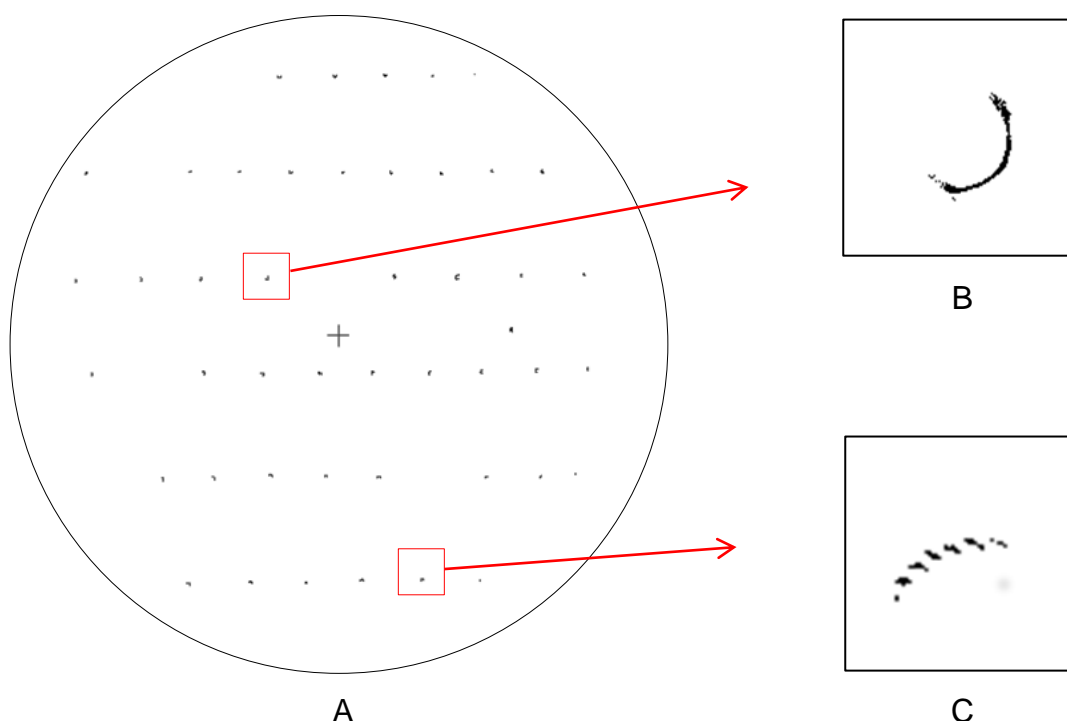


FIGURA 18 - A) RECORTE 2D DE UMA UNIDADE AMOSTRAL DE 400 m^2 EM UM PLANTIO DE 2 ANOS. B) SEÇÃO TRANSVERSAL PRÓXIMA AO EQUIPAMENTO NA FORMA DE UM SEMICÍRCULO. C) SEÇÃO TRANSVERSAL NA BORDA DA UNIDADE AMOSTRAL.
FONTE: O autor (2015).

Para árvores da borda (FIGURA 18C), a seção transversal não apresenta formato regular de semicircunferência podendo conter pontos insuficientes para a determinação de variáveis dendrométricas com acurácia.

Em unidades amostrais de 400 m², o efeito de sombreamento é maior, sendo assim, as árvores da borda ficam ocultas devido ao bloqueio de pontos ocasionado principalmente por árvores mais próximas ao equipamento (FIGURA 19), porém em relação às características de plantio, o desalinhamento das árvores em relação às entre linhas, auxiliou na detecção automática pelo algoritmo.

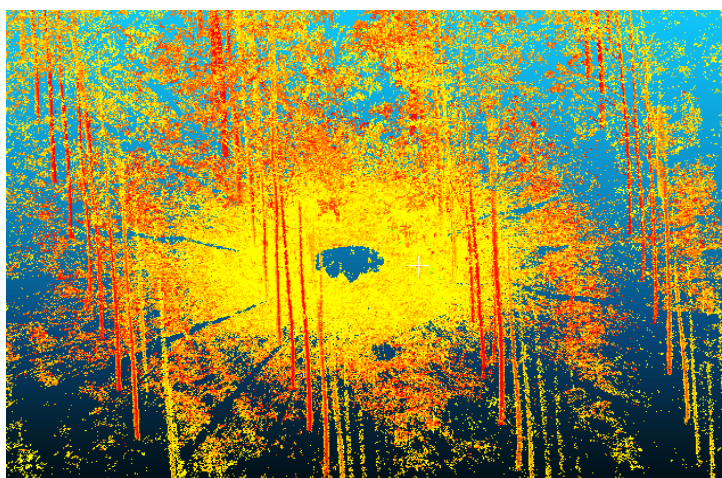


FIGURA 19 - EFEITO DE SOMBREAMENTO OCASIONADO POR ÁRVORES PRÓXIMAS AO EQUIPAMENTO, EM UM PLANTIO DE 2 ANOS.
FONTE: O autor (2015).

O sombreamento formado pelas árvores está relacionado com o tamanho da unidade amostral e o diâmetro das árvores. Outro fator é o posicionamento do equipamento em relação às linhas de plantio, podendo haver um aumento do número de árvores ocultas caso estejam totalmente alinhadas no sentido X e Y, e consequentemente, as informações referentes às mesmas não podem ser obtidas pela varredura *laser*. Cabe ressaltar, que a posição do equipamento pode ser muito variável, pois dependem de vários fatores, entre eles, o espaçamento, a topografia do terreno e o tamanho das unidades amostrais.

De acordo com os resultados do número de árvores detectadas por tamanho de unidade amostral (TABELA 6), constatou-se que em todas as idades analisadas foram encontrados erros, exceto na idade de 2 anos sem desrama nas unidades amostrais de 200 m² (FIGURA 20A) e 300 m² (FIGURA 20B). Isto corrobora com o

fato de que a detecção automática tem melhores resultados em unidades amostrais menores e com árvores com diâmetros menores e também indica que a presença de galhos não interfere na detecção das árvores.

TABELA 6 - PORCENTAGEM MÉDIA DE ÁRVORES DETECTADAS

Idade (anos)	200 m ²	300 m ²	400 m ²
2 (sem desrama)	100,0	100,0	90,2
2	99,0	99,2	97,8
4,5	96,9	95,2	90,6
5,5	97,6	97,6	97,2

A detecção das árvores nas unidades amostrais foi em média, acima de 94,2% em todas as idades e tamanhos de unidades amostrais (FIGURA 21).

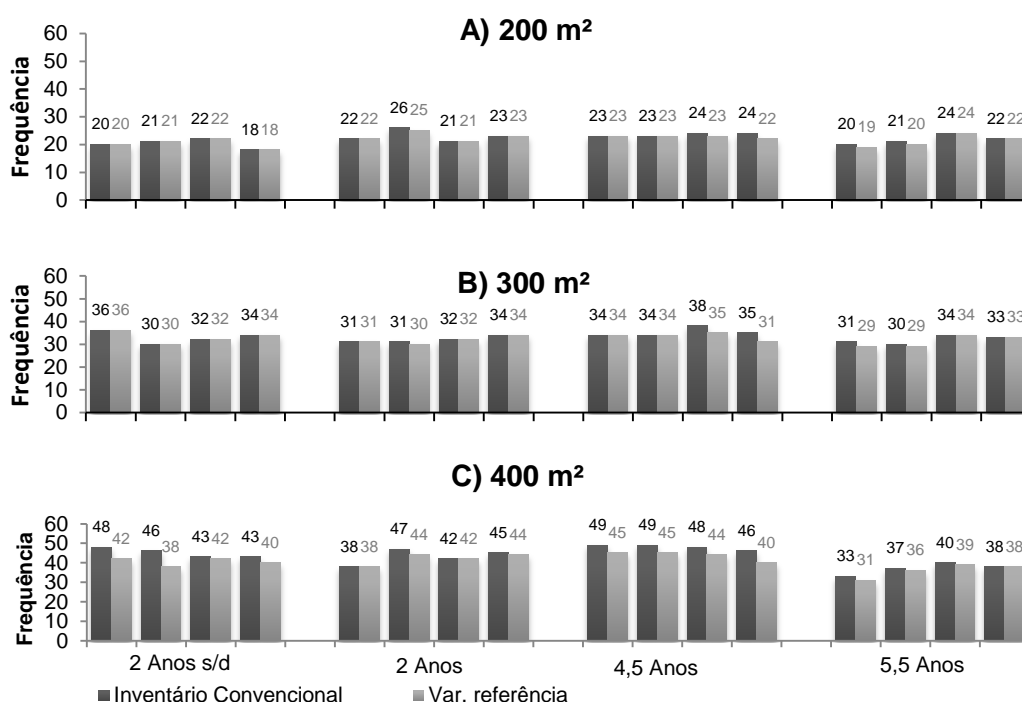


FIGURA 20 - ÁRVORES DETECTADAS AUTOMATICAMENTE A PARTIR DA VARREDURA SIMPLES POR IDADE DE PLANTIO, EM DIFERENTES TAMANHOS DE UNIDADES AMOSTRAIS.

FONTE: O autor (2015).

Para unidades amostrais de 200 m² (FIGURA 20A), na idade de dois anos, o método de detecção pelo *laser* identificou 99% das árvores, e para 300 (FIGURA 20B) e 400 m² (FIGURA 20C), ocorreu a diminuição da acurácia, detectando 99,2 e 97,8% de árvores respectivamente. Os maiores erros de detecção foram observados na unidade amostral de 400 m² (FIGURA 20C) para as idades de 4,5 e 5,5 anos, e provavelmente deve-se à ocorrência de maiores diâmetros.

Os resultados demonstraram que à medida que aumenta a idade do plantio e o tamanho da unidade amostral diminui a porcentagem de árvores detectadas. Como discutido no item 4.1, as idades de 4,5 e 5,5 anos apresentam distribuição diamétrica com maior frequência de número de árvores, no centro de classe 17 cm e 19 cm (amplitude de 3 cm) para ambas as idades, comprovando que o diâmetro tem forte influência no sombreamento de árvores de borda.

A vantagem de utilizar varreduras simples, é que o processamento dos dados é mais rápido e menos trabalhoso quando comparado a varreduras múltiplas, pois é dispensável a operação de registro.

O algoritmo para a detecção do fuste é independente, a priori, do conhecimento da estrutura e formato dos dados (LIANG *et al.*, 2012). Na pesquisa descrita por esses autores usando varredura simples em florestas de coníferas, obteve-se 73% de acurácia na detecção de árvores com unidades amostrais circulares de 314 m², para uma densidade de 1022 árvores/ha⁻¹. Para esta pesquisa, a acurácia global foi de 96,7%. A comparação dos resultados torna-se necessária, pois comprova que o arranjo das árvores na parcela interfere positivamente no resultado da detecção.

O algoritmo de detecção automática, por levar em consideração o limiar de busca das seções transversais (1,5 metros) pode eventualmente detectar os alvos instalados no interior da unidade amostral, identificando-os erroneamente como árvore, mas por outro lado, como são instalados entre as linhas de plantio, podem ser identificados visualmente com certa facilidade (FIGURA 21) e assim ser eliminados manualmente.

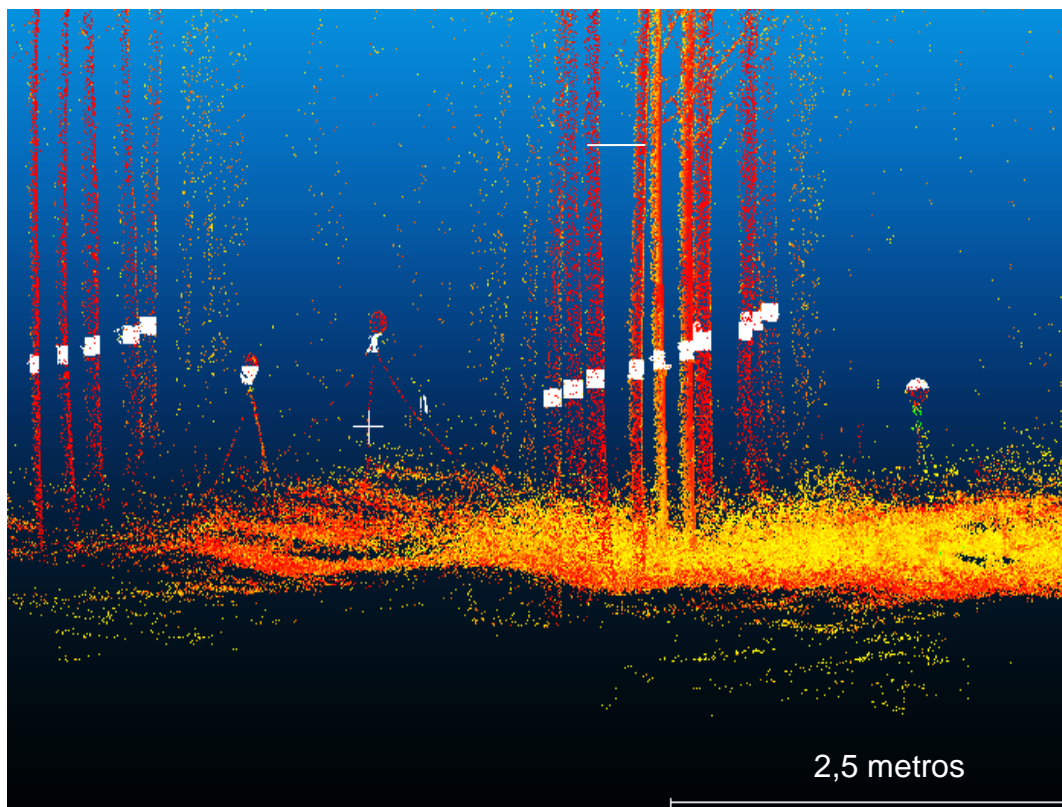


FIGURA 21 - ÁRVORES DETECTADAS POR MEIO DA VARREDURA SIMPLES NA ALTURA DO DAP E TRÊS ALVOS DETECTADOS ERRONEAMENTE COMO ÁRVORE.

FONTE: O autor (2015).

A alta precisão de detecção de árvores (acima de 86%) foi relatada apenas em florestas com baixa densidade de árvores (212 a 605 árvores/ha⁻¹), diferentemente desta pesquisa onde o número médio é de 1044 árvores/ha⁻¹. Mass, *et al.* (2008) e Liang (2013) alcançaram uma precisão de detecção acima de 80% em unidades amostrais com uma densidade menor do que 410 árvores/ha⁻¹. A precisão de detecção é relatada como 59 a 72% em florestas com densidade de até 735 árvores/ha⁻¹ (WEZYK *et al.*, 2007).

Os resultados de detecção de árvores em florestas temperadas, com diferentes densidades de árvores e tamanho de unidades amostrais, não devem ser entendidos como uma comparação rigorosa com esta pesquisa (TABELA 7), pois os resultados de detecção dependem do tamanho e forma das unidades amostrais, da densidade de árvores, do tipo de floresta, da resolução de varredura e dos algoritmos de processamento.

TABELA 7 - PRECISÃO DE DETECÇÃO DE ÁRVORES PARA VARREDURA SIMPLES RELATADA EM ESTUDOS ANTERIORES EM COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS OBTIDOS NESTA PESQUISA.

	Nº de U.A.*	Unidades Amostras		Detecção	
		Raio	Área (m²)	Árvores/ha	%
Thies e Spiecker, (2004)	1	-	900	555,6	22
Maas <i>et al.</i> (2008)	3	15 m	707	212-410	86.7-100
Strahler <i>et al.</i> (2008)	1	50 m	7854	130	40,2
Brolly e Kiraly, (2009)	1	30 m	2827	753	62,9-72,3
Murphy <i>et al.</i> (2010)	18	-	1000	207-570	59
	15	10-20 m	314-1257	153-326	82
Lovell <i>et al.</i> (2011)	2	20-50 m	1257-7854	124/477	54 - 68
Liang <i>et al.</i> (2012)	9	10 m	314	509-1432	73
Liang <i>et al.</i> (2013)	5	10 m	314	605-1210	73,4
Presente pesquisa	16	7,98 m	200	827 – 1262	98,3
		9,77 m	300	827 – 1262	98
		12,28 m	400	827 – 1262	93,9

*U.A.: Unidade Amostral

Na gestão de povoamentos florestais como os reflorestamentos de *Eucalyptus* spp, a maioria das árvores pode ser localizada usando varreduras simples, porém segundo (LIANG *et al.*, 2012), o emprego de varreduras múltiplas melhora substancialmente tanto a detecção de árvores, quanto acurácia na determinação de variáveis dendrométricas.

A maioria dos estudos utilizando o TLS usa em suas análises unidades amostrais pequenas, sendo a maior parte com tamanho entre 10 e 200 m² (FASSNACHT *et al.*, 2014). Nota-se que embora o tamanho da unidade amostral seja diferente em vários estudos, as unidades amostrais menores para reflorestamento de *Eucalyptus* spp são mais indicadas quando se utiliza varreduras simples.

4.4.2 Duas varreduras

A adoção de duas posições do equipamento, ou seja, duas visadas de

perspectivas diferentes são superiores em comparação com varreduras simples, devido ao maior número de pontos *laser* que são refletidos pelas árvores, porém consequentemente o volume de dados é alto, necessitando maior tempo de processamento.

Como não foi possível a detecção de 100% das árvores utilizando varreduras simples, foram então testadas varreduras múltiplas, a fim de verificar qual ou quais os melhores posicionamentos para realização da coleta dos dados. De acordo com os resultados encontrados, as varreduras “referência e externa” (E_R e E_1) e “perpendiculares” (E_2 e E_3) são mais eficazes na detecção de árvores em relação às varreduras “opostas” (E_1 e E_3) ou “paralelas” (E_1 e E_2).

As unidades amostrais de 200 e 300 m² (FIGURA 22A) foram as que apresentaram os melhores resultados.

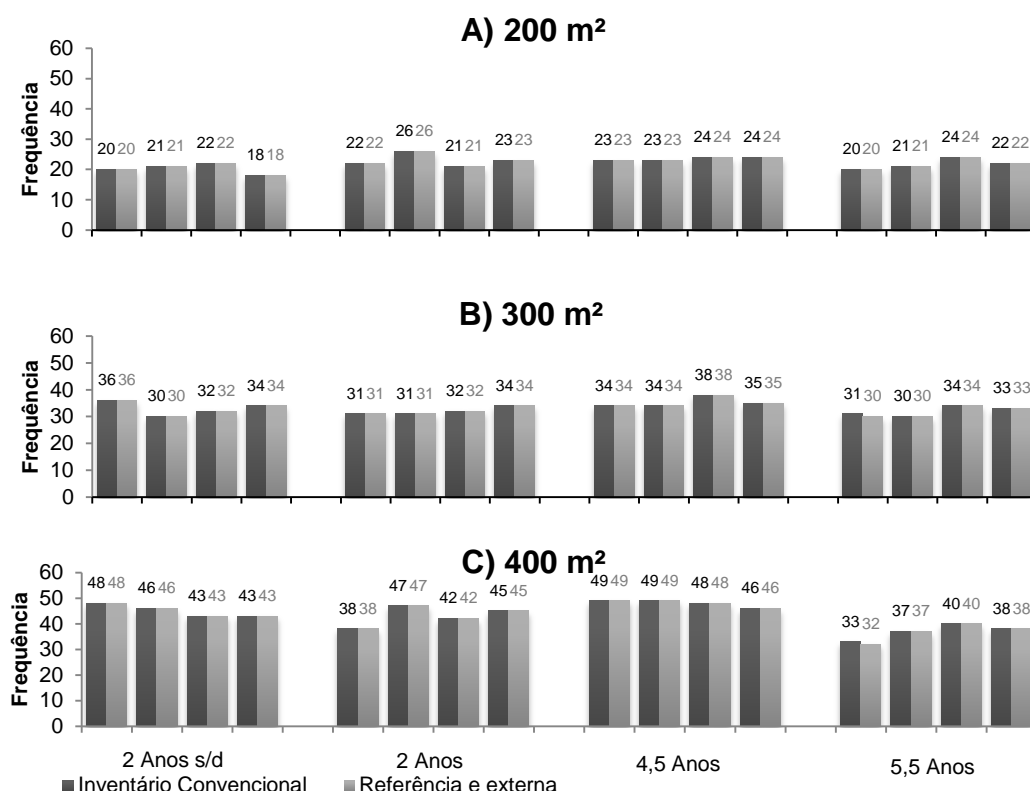


FIGURA 22 - COMBINAÇÃO DE VARREDURA “REFERÊNCIA E EXTERNA” POR UNIDADE AMOSTRAL: 200 m² (A), 300 m² (B) e 400 m² (C).
FONTE: O autor (2015).

A taxa de detecção em unidades amostrais de 300 m² (FIGURA 22B) e 400

m² (FIGURA 22C) foram de 100% até a idade de 4,5 anos. Para a idade de 5,5 anos em apenas uma unidade amostral uma árvore não foi detectada.

Assim como na varredura “referência e externa” (E_R e E_1), a utilização de varreduras “opostas” (E_1 e E_3), foram detectadas 100% das árvores em unidades amostrais de 200 m² nas três idades (FIGURA 23A), porém este arranjo de varredura não foi eficaz nos tamanhos de 300 e 400 m².

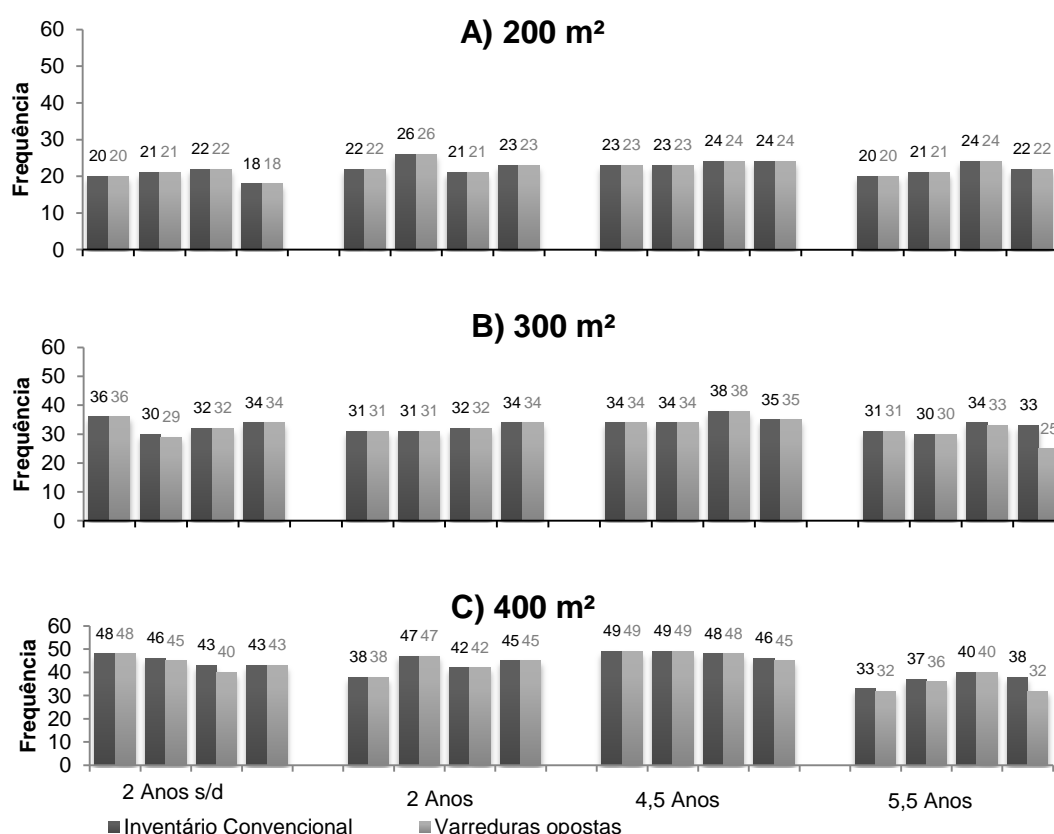


FIGURA 23 - DETECÇÃO AUTOMÁTICA POR UNIDADE AMOSTRAL DE 200, 300 e 400 m² A PARTIR DE VARREDURAS OPOSTAS.
FONTE: O autor (2015).

As varreduras “opostas” (E_1 e E_3), ocultam mais árvores em relação à varredura “referência e externa” (E_R e E_1) para os tamanhos de 300 m² (FIGURA 23B) e 400 m² (FIGURA 23C) para a idade de 5,5 anos.

Para as unidades amostrais de 300 m² (FIGURA 23B), na idade de 2 anos, s/d houve acerto de 100% em três unidades amostrais, sendo que em apenas uma não foi identificada uma árvore, devido ao efeito de sombreamento.

Em contrapartida, analisando o sombreamento da seção transversal pelos pontos *laser*, as varreduras “perpendiculares” (E_1 e E_2) (FIGURA 24), apresentam resultados inferiores em comparação com as varreduras “opostas” (E_1 e E_3) e “referência e externa” (E_R e E_1). Isto pode ser explicado, porque ambos os ângulos da varredura perpendicular (FIGURA 26B) estão direcionados para a estação referência, isto é, em apenas uma direção em relação à unidade amostral.

A varredura “perpendicular” (E_1 e E_2), adotando unidades amostrais de 200 m², foram detectadas 100% das árvores, como na combinação de varredura “oposta” (E_1 e E_3) e “referência e externa” (E_R e E_1), porém a distância do equipamento para as árvores da borda da unidade amostral está a aproximadamente 20 m (mesmo caso para varreduras “paralelas”), diminuindo assim, o número de pontos na seção transversal da árvore.

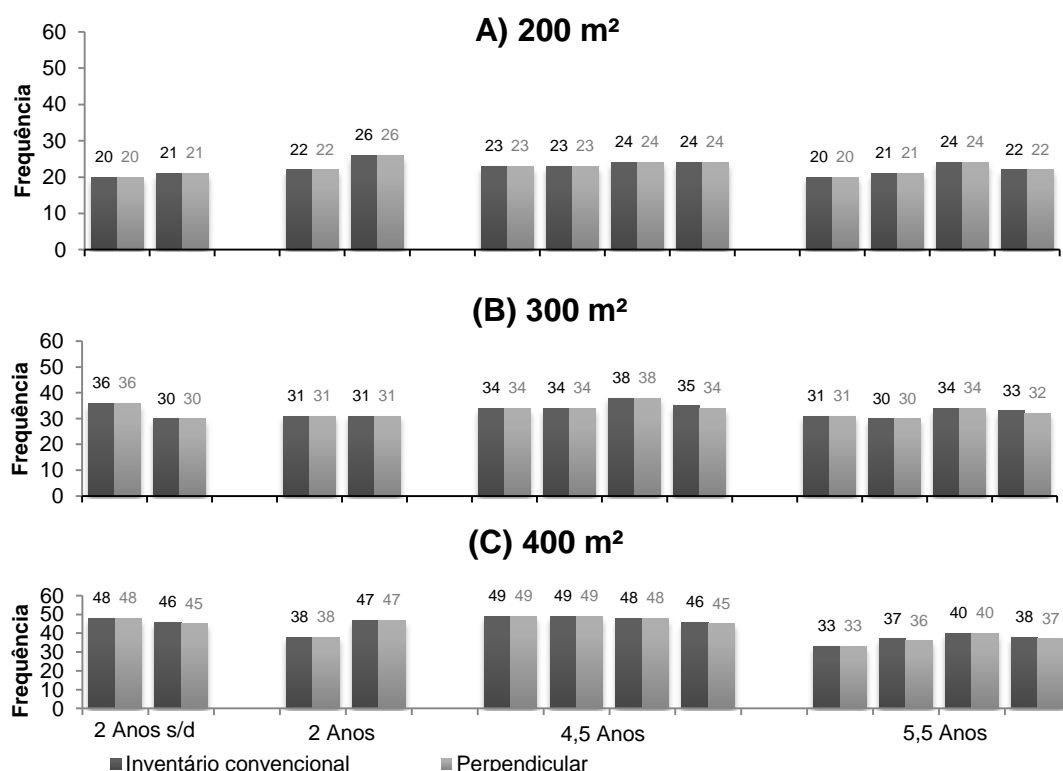


FIGURA 24 - DETECÇÃO AUTOMÁTICA POR UNIDADE AMOSTRAL DE 200 m² (A), 300 m² (B) e 400 m² (C) COM A COMBINAÇÃO DE VARREDURAS PERPENDICULAR.

FONTE: O autor (2015).

Para unidades amostrais de 300 m², somente nas idades de 2 anos, foram detectadas 100% das árvores. Nas idades de 4,5 e 5,5 anos apenas uma árvore não foi detectada em uma unidade amostral.

As varreduras “paralelas” (FIGURA 25) apresentaram resultados inferiores de detecção de árvores em comparação com as varreduras duplas “referência e externa” e “perpendiculares” para as unidades amostrais de 300 (FIGURA 25B) e 400 m² (FIGURA 25C).

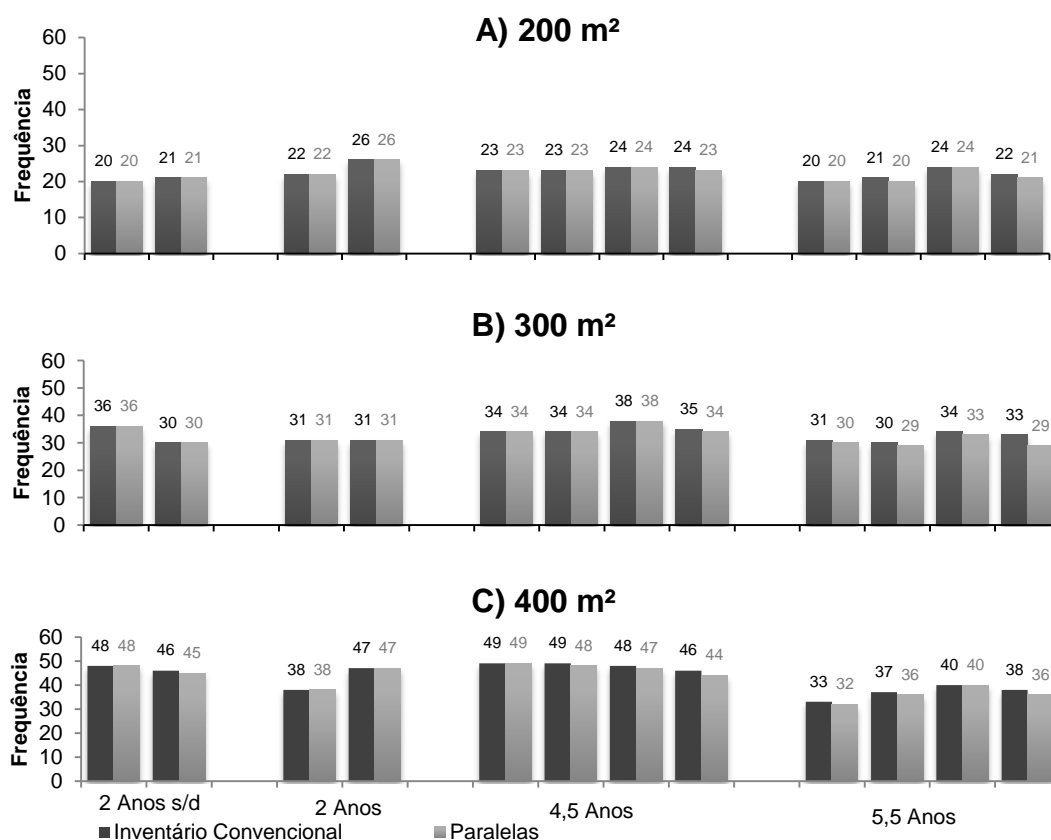


FIGURA 25 - DETECÇÃO AUTOMÁTICA POR UNIDADE AMOSTRAL DE 200 m² (A), 300 m² (B) E 400 m² (C) COM A COMBINAÇÃO DE VARREDURAS “PARALELAS”.

FONTE: O autor (2015).

Para as unidades amostrais de 200 e 300 m² (FIGURA 25A) foram detectadas 100% das árvores nas idades de 2 anos s/d e 2 anos, sendo que para as demais idades ocorreu erros de detecção. A desvantagem da varredura “oposta” (FIGURA 26A) em comparação com varredura “paralela” (FIGURA 26B), é que as visadas do equipamento *laser* ficam mais distantes entre si, e devido ao alinhamento das árvores o sombreamento aumenta.

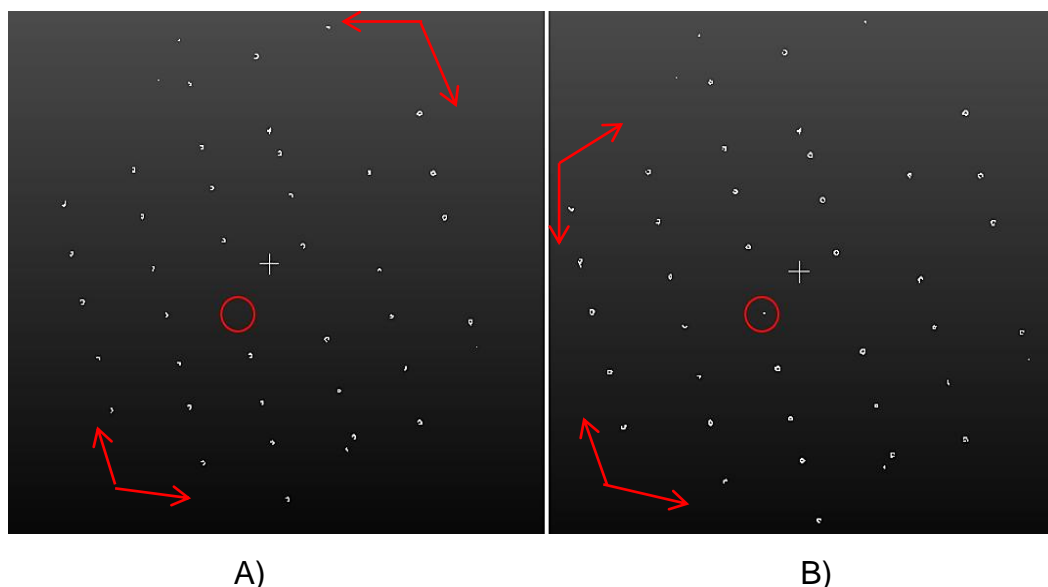


FIGURA 26 - (A) DETECÇÃO DE ÁRVORES EM VARREDURA OPOSTA E (B) VARREDURA PARALELA ÀS LINHAS DE PLANTIO.
 FONTE: O autor (2015).

Mass *et al.* (2008) obteve uma acurácia de detecção de 100% com densidade de 309 árvores/ha⁻¹, porém utilizando três varreduras. Huang *et al.* (2010) obteve uma acurácia de detecção de 99,6% para cinco unidades amostrais de 1000 m² e densidade de 570 árvores/ha⁻¹. Confrontando os resultados encontrados nesta pesquisa para duas varreduras, a acurácia foi de 100% para unidades amostrais de 200 m², com alta densidade de árvores (827 a 1262 árvores/ha⁻¹) até a idade de 4,5 anos, comprovando que o algoritmo de detecção automática de árvores foi eficaz na detecção de árvores para esta área de estudo.

4.4.3 Três varreduras

A vantagem em se utilizar três posições de varredura está na maior cobertura do tronco pelos pontos *laser*, apresentando resultados mais acurados para etapas posteriores de processamento como a determinação de diâmetros e volume. Em contrapartida, o tempo para realização de três varreduras, é em média 27,6% maior em relação às varreduras duplas e 47,6 % para varredura simples.

Para varreduras múltiplas adotando três posições do equipamento com a varredura “referência e duas opostas”, foram detectadas 100% das árvores em todas as idades e tamanhos de unidades amostrais (FIGURA 27).

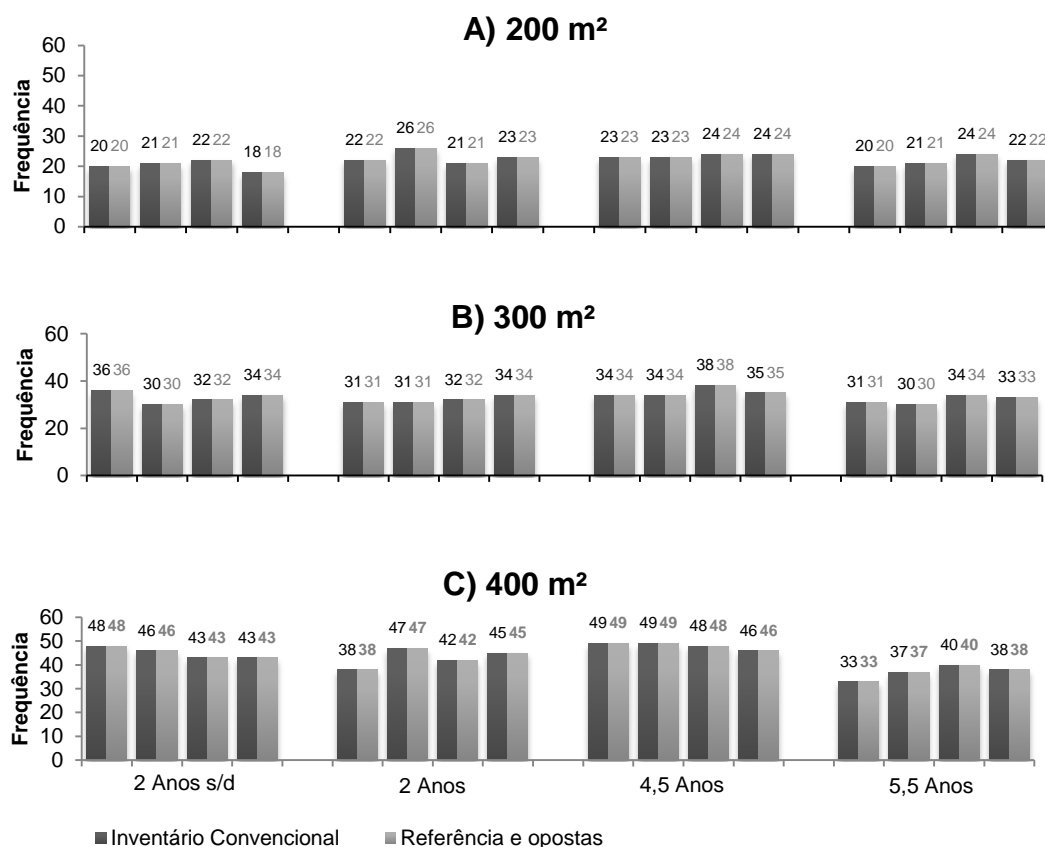


FIGURA 27 - DETECÇÃO AUTOMÁTICA POR UNIDADE AMOSTRAL DE 200 m² (A), 300 m² (B) E 400 m² (C) A PARTIR DA VARREDURA MÚLTIPLA “REFERÊNCIA E OPOSTAS”.
FONTE: O autor (2015).

Nas varreduras triplas “referência e opostas” (E_R , E_1 e E_3), foi possível a detecção de 100% das árvores para todas as idades e tamanhos de unidades amostrais. O número de varreduras necessário para a detecção automática de 100% das árvores, principalmente na idade de 5,5 anos está relacionado principalmente com o diâmetro, pois nesta idade os diâmetros são maiores, e assim é necessária a realização de três varreduras.

A combinação da varredura “referência e perpendiculares” (E_R , E_1 e E_4), também foi eficaz na detecção de 100% das árvores nos três tamanhos de unidade amostrais (FIGURA 28).

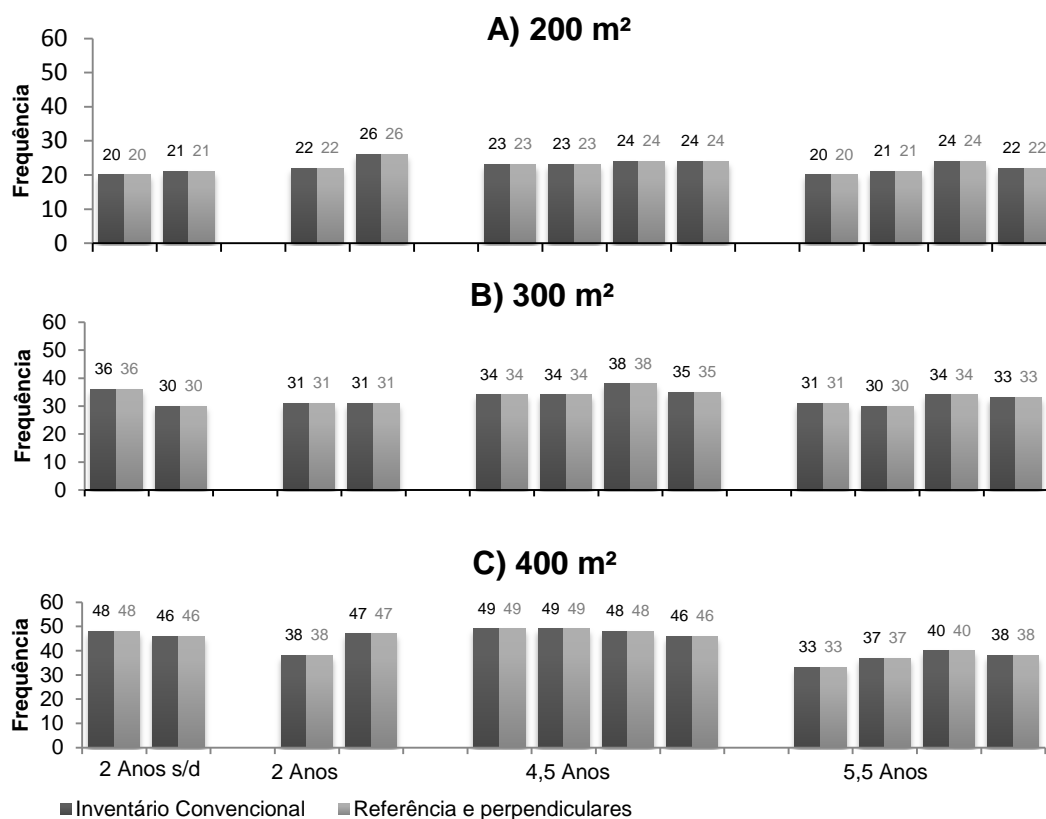


FIGURA 28 - DETECÇÃO AUTOMÁTICA POR UNIDADE AMOSTRAL DE 200 m² (A), 300 m² (B) E 400 m² (C) A PARTIR DA VARREDURA MÚLTIPLA “REFERÊNCIA E PERPENDICULARES”.
FONTE: O autor (2015).

A desvantagem da varredura “referência e perpendiculares” (FIGURA 28) em relação à “referência e opostas” está no posicionamento do equipamento em relação às linhas de plantio (FIGURA 29).

A varredura tripla “referência e perpendiculares” (FIGURA 29) ocorre o fechamento de 75% das seções transversais por pontos *laser*, independentemente da idade de plantio devido a visada do equipamento. Em contrapartida a varredura “referência e opostas” 87% das árvores apresentam pontos *laser* em todo o seu entorno. A varredura “referência e opostas”, em comparação com a “referência e perpendiculares” é a melhor forma de posicionamento utilizando três varreduras, devido ao fechamento das seções transversais.

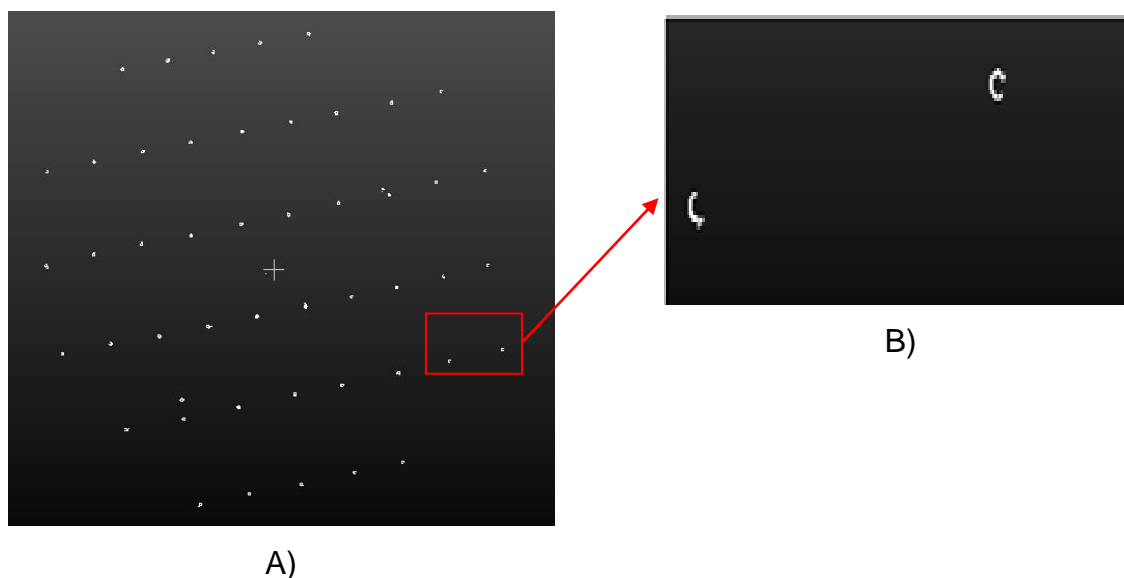


FIGURA 29 - A) PROJEÇÃO 2D DE UMA NUVEM DE PONTOS PARA A VARREDURA “REFERÊNCIA E PERPENDICULARES” EM UMA UNIDADE AMOSTRAL DE 400 m² PARA O PLANTIO DE 2 ANOS. B) DETALHE DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS NA BORDA DA UNIDADE AMOSTRAL.
FONTE: O Autor (2015)

A TABELA 8 resume os resultados da detecção de árvores relatados nas referências anteriores.

TABELA 8 - RESULTADO DA DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE ÁRVORES UTILIZANDO DIFERENTES TAMANHOS DE UNIDADES AMOSTRAIS E NÚMERO DE VARREDURAS.

Autores	Área U.A. (m ²)	Densidade (Árvores/ha)	Número de varreduras	Resultado em %
Simonse <i>et al.</i> (2003)	625 m ²	448	4	92,9
Thies e Spiecker (2004)	900 m ²	555,6	5	52
Maas <i>et al.</i> (2008)	452 m ²	309	3	100
Murphy <i>et al.</i> (2010)	990 m ² e 1000 m ²	207 – 570	5	99,6
Huang <i>et al.</i> (2011)	1225 m ²	212	4	100
Presente pesquisa	200 m ²	827 – 1262	2	100
	300 m ²	827 – 1262	3	100
	400 m ²	827 - 1262	3	100

Cabe ressaltar, que a Floresta Boreal é muito diferente de povoamentos de *Eucalyptus spp*, principalmente pelo espaçamento regular de plantio, onde o efeito de sombreamento das árvores é mais evidente. Mass *et al.* (2008) adotando

unidades amostrais com raio de 10 m, utilizando três varreduras, também detectou 100%, porém, a densidade de árvores nesta pesquisa é aproximadamente 4 vezes maior.

A precisão de detecção para varreduras múltiplas (TABELA 8) foi na ordem de 93 e 100% (SIMONSE *et al.*, 2003; MURPHY *et al.*, 2010; HUANG *et al.*, 2011), muito similar ao resultado encontrado nesta pesquisa, porém utilizando maior número de varreduras, porém o objetivo destas pesquisas além da determinação do DAP, era a obtenção do volume, o que justifica um número maior de posicionamentos do equipamento.

4.4.4 Análise estatística

O teste L&O somente foi aplicado para as combinações de varredura onde não foram detectadas 100% das árvores, considerando os três tamanhos de unidades amostrais (TABELA 9).

TABELA 9 - RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO L&O PARA O NÚMERO DE ÁRVORES OBTIDOS NO CAMPO E PELO ALGORITMO DE DETECÇÃO AUTOMÁTICA.

U.A.	Varreduras	Nº de varreduras	F (H ₀)	t _e	R ²	CV %	Decisão
200 m ²	Referência	1	4,038 ns	2,448 ns	0,9005	2,7678	Yj ≠ Y1
	Referência	1	3,289 ns	2,267 ns	0,7063	3,78	Yj ≠ Y1
300 m ²	Referência e externa	2	1,485 ns	1,00 ns	0,9889	0,73	Yj ≠ Y1
	Paralelas	2	1,865 ns	2,015 ns	0,8397	3,72	Yj ≠ Y1
	Perpendiculares	2	1,176 ns	1,482 ns	0,9765	1,22	Yj ≠ Y1
400 m ²	Referência	1	21,058*	4,706*	0,7574	4,77	Yj ≠ Y1
	Referência e externa	2	3,911 ns	1,00 ns	0,9982	0,49	Yj = Y1
	Paralelas	2	5,734 ns	3,393*	0,9837	1,83	Yj ≠ Y1
	Perpendiculares	2	3,572 ns	2,772 ns	0,9917	1,26	Yj = Y1

F (H₀) = teste F de Graybill, t_e = teste t, R² = Coeficiente de determinação, CV = Coeficiente de variação. α = nível de significância de 1%.

De acordo com o teste estatístico L&O com um nível de significância de 5%, pôde-se verificar que para os tamanhos de 200 e 300 m² ocorreu rejeição de H_0 , sendo assim, foram observadas diferenças significativas entre o número de árvores observado em campo e o detectado automaticamente pelo algoritmo. Para as unidades amostrais de 400 m², as varreduras múltiplas “referência e externa” e “perpendiculares”, o teste apresentou concordância entre o número de árvores observado em campo e detectado pelo algoritmo, sendo iguais estatisticamente ao nível de 99% de probabilidade.

O resultado do teste F de Graybill ($F(H_0)$), para as unidades amostrais de 200 e 300 m² foi não significativo, ou seja, os valores observados são iguais estatisticamente aos valores encontrados pelo algoritmo. Em relação ao teste t , também foi constatado a não significância para os tamanhos de 200 e 300 m². Para as unidades amostrais de 400 m², os valores de $F(H_0)$ e t foram significativos, portanto foi observada diferença estatística.

Pôde-se verificar, também, que as unidades amostrais de 200 m², tiveram maior correlação ($R = 0,9$) em comparação com os demais tamanhos. Dessa forma, o CV% também foi menor para as unidades amostrais de 200 m² (2,76%), em relação às unidades amostrais de 300 e 400 m², 3,78% e 4,77% respectivamente. Como exposto anteriormente, cabe ressaltar que para as unidades amostrais de 200 m² utilizando todas as varreduras duplas e triplas, 100% das árvores foram detectadas em todas as idades. Para 300 e 400 m² é necessária a adoção de arranjos com três varreduras para detectar todas as árvores da parcela, na idade de 5,5 anos, sendo assim, estes resultados não foram contemplados pela análise estatística.

4.5 DETERMINAÇÃO DE DIÂMETROS

4.5.1 Número de varreduras *versus* determinação do DAP.

As varreduras, sendo elas simples, duplas ou triplas e a espessura da fatia de

10 centímetros (1,25 -1,35 m), foram satisfatórias para estimar o DAP em todas as unidades amostrais.

A forma da seção transversal (FIGURA 30) de *Eucalyptus* spp e principalmente a adoção de varredura simples a qual retrata somente uma face do tronco, em comparação com varreduras múltiplas, é certamente um fator importante que contribui para a acurácia na estimativa do diâmetro.

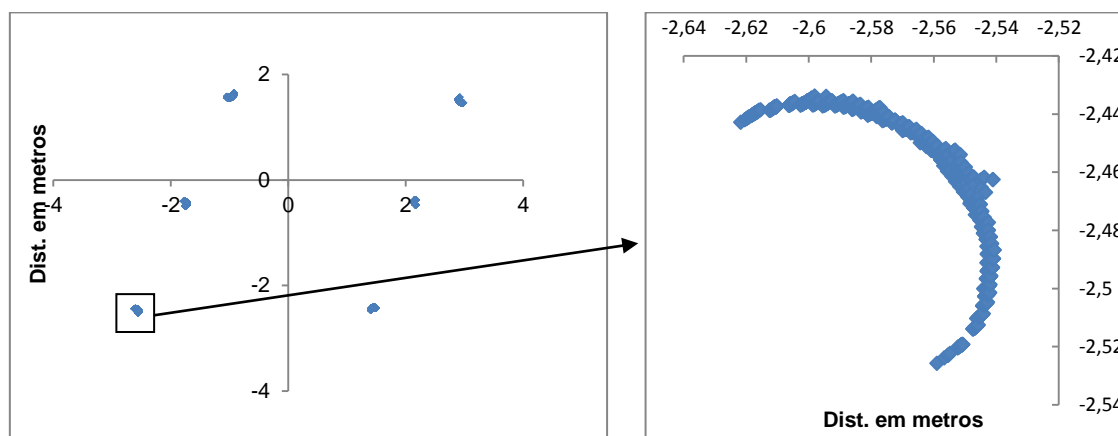


FIGURA 30 - SEÇÃO TRANSVERSAL OBTIDA ATRAVÉS DA VARREDURA SIMPLES.

FONTE: O Autor (2015).

Pueschel *et al.* 2013 cita que a presença de ruídos, como casca e galhos adjacentes à seção transversal ou ao tronco da árvore, tem influência na precisão de estimativa do diâmetro se não forem excluídos. Como o algoritmo de distância máxima calcula a maior distância entre os pontos da seção, pode ocorrer superestimativa. Cabe destacar que os plantios de *Eucalyptus* spp. considerados neste estudo, sobretudo na idade de 2 anos (s/d), até a altura do DAP, estão ausentes de galhos, o que facilita o processo de determinação do diâmetro, porém nas demais idades em alguns casos foi necessária a exclusão de forma manual.

A vantagem do uso de varreduras múltiplas para medições de DAP é devido à cobertura multiangular (MOSKAL e ZHENG, 2012; THIES e SPIECKER, 2004), pois além de representar melhor a forma do tronco, aumenta as taxas de detecção de árvores. Porém é um processo mais demorado, pois necessita realizar a operação de registro da nuvem de pontos e exige algoritmos mais complexos para processamento dos dados.

Pueschel *et al.* (2013), determinou o DAP a partir de varredura simples e múltipla e concluiu que a utilização de duas varreduras têm menor erro médio quadrático (0,66 cm a 1,21 cm) em comparação com varredura simples, (1,39 cm a 2,43 cm), resultado semelhante ao encontrado nesta pesquisa. A análise sobre a determinação do DAP para varreduras simples, duplas e triplas foram de elevada qualidade, sendo iguais estatisticamente ao nível de probabilidade estabelecido, porém para varreduras simples, os resultados foram ligeiramente inferiores.

Os resultados de diâmetro médio, mínimo e máximo por idade, considerando os três tamanhos de unidades amostrais (200, 300 e 400 m²), são apresentados nas FIGURA 31 a 33.

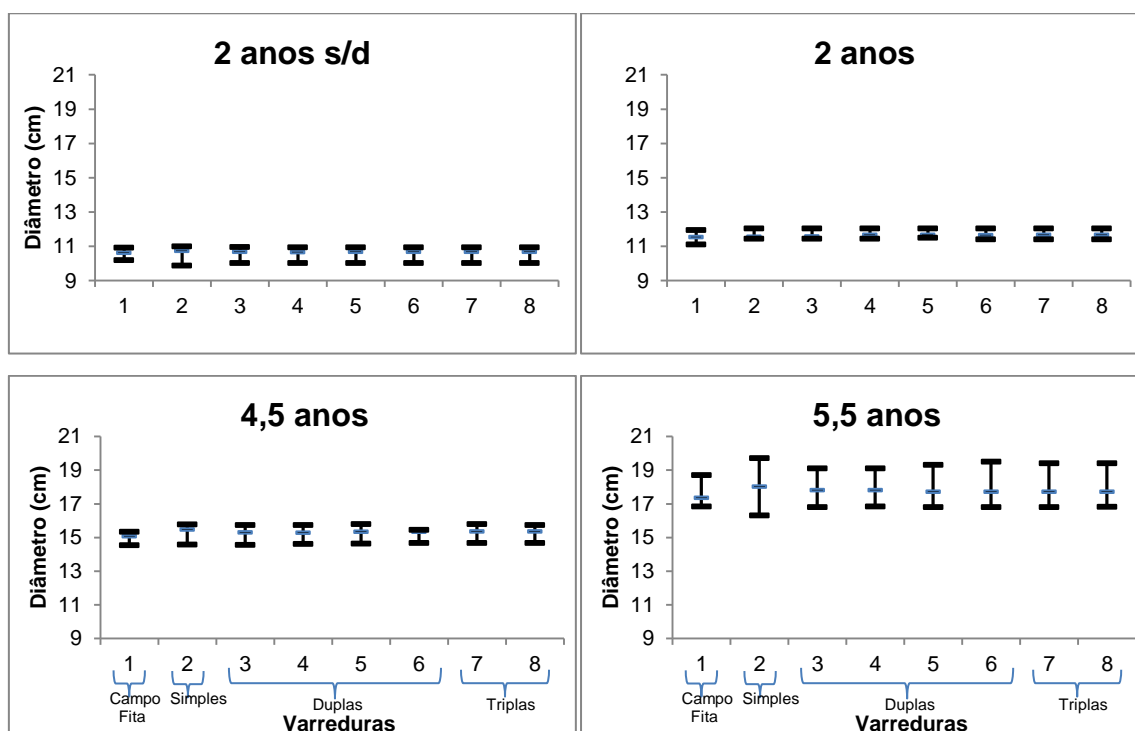


FIGURA 31 - DIÂMETROS MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS POR IDADE EM UNIDADES AMOSTRAIS DE 200 m². CAMPO (1), SIMPLES (2), OPOSTAS (3), PARALELAS (4), PERPENDICULARES (5), REFERÊNCIA E EXTERNA (6), REFERÊNCIA E PERPENDICULARES (7) E REFERÊNCIA E OPOSTAS (8).
FONTE: O Autor (2015).

A idade de 2 anos, s/d apresentou maior variação com tendência a superestimar os diâmetros principalmente para varredura simples (FIGURA 31) com variação de 0,7 cm. Para as varreduras múltiplas, pode-se analisar que os diâmetros médios obtidos pelo algoritmo de distância máxima em comparação com o

obtido convencionalmente, foram ligeiramente próximos ao diâmetro médio obtido pelo inventário convencional com variação média de 0,4 cm. É possível observar que as varreduras duplas (4,5 e 6), obtiveram valores médios de diâmetro, próximos às varreduras triplas (7 e 8), com variação máxima na ordem de -14 a +15%.

Em todas as idades, o uso de varredura simples é a que apresenta maior desvio em relação aos diâmetros obtidos convencionalmente com fita métrica, porém o erro médio encontrado em torno de 17% pode ser considerado como satisfatório. Na idade de 5,5 anos apresentou maior acurácia em relação ao diâmetro médio obtido convencionalmente, porém a variabilidade entre diâmetros nas unidades amostrais é maior. Thies e Spiecker (2004) relataram medidas do DAP com erro médio (desvio) de 1,3%, em relação aos dados tradicionais (suta), quando aplicaram a metodologia proposta por Simonse *et al.* (2003). Para comparar os dois trabalhos, considerando-se a melhor medida *laser* que teve um erro médio de -3% e confrontando-se com a medida da sutra (-6%), tem-se um erro médio em relação à sutra de 3%.

De modo geral, as varreduras duplas e triplas (FIGURA 31) para as unidades amostrais de 200 m², tiveram pouca variação (0,3 e 0,4 cm), sendo assim, o uso de um número menor de posicionamentos do equipamento deve ser considerado. Na idade de 2 anos com as mesmas varreduras, apresentou variação de 0,22 cm e 0,17 cm respectivamente. Nota-se que a variação entre o diâmetro mínimo e máximo são homogêneos e os diâmetros médios apresentam valores muito próximos do diâmetro médio obtido no levantamento convencional.

O método de Distância Máxima, por calcular a maior distância entre os pontos da seção transversal, tende a superestimar os valores de diâmetro (SILVA, 2011), o que foi observado nesta pesquisa, porém são iguais estatisticamente ao valor observado no campo convencionalmente.

Para as unidades amostrais de 300 m² (FIGURA 32), os resultados para as idades de 2 anos, apresentaram variação homogênea entre as combinações de varredura em relação ao diâmetro obtido convencionalmente. Para a idade de 4,5 anos, nota-se maior variação superestimando o diâmetro médio em 0,39 cm para varredura simples e 0,35 para varreduras múltiplas. A maior amplitude entre o diâmetro mínimo e máximo para a idade de 5,5 anos, não diz respeito ao erro na determinação, mas da própria variabilidade diamétrica do plantio nesta idade.

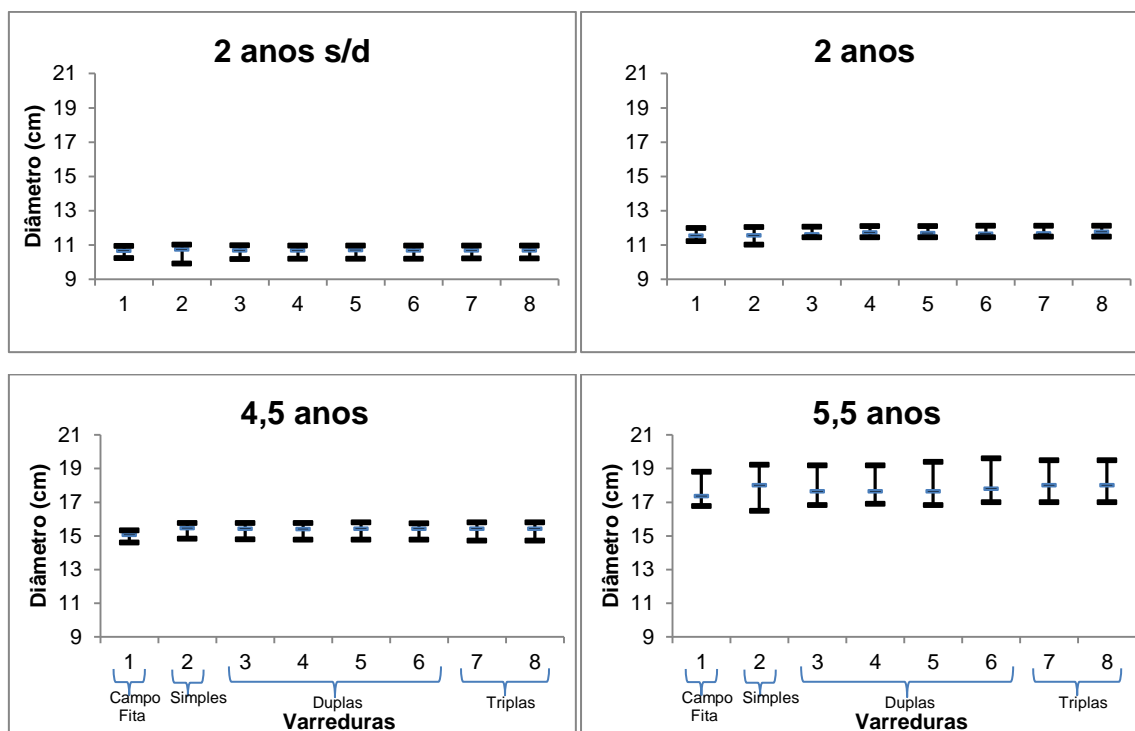


FIGURA 32 - DIÂMETROS MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS POR IDADE, EM UNIDADES AMOSTRAIS DE 300 m². CAMPO (1), SIMPLES (2), OPOSTAS (3), PARALELAS (4), PERPENDICULARES (5), REFERÊNCIA E EXTERNA (6), REFERÊNCIA E PERPENDICULARES (7) E REFERÊNCIA E OPOSTAS (8).
FONTE: O Autor (2015).

As combinações de varreduras múltiplas, duplas e triplas, demonstraram ser de alta qualidade para a obtenção do diâmetro, independentemente do tamanho da unidade amostral. A varredura “referência e externa”, “referência e perpendiculares” e “referência e opostas”, apresentaram resultados mais precisos com variação de 0,4 cm em relação ao diâmetro médio obtido convencionalmente. Nota-se que para os arranjos de varredura simples e múltipla, o diâmetro médio tende a estar mais próximo dos valores máximos, o que está relacionado com as frequências de árvores nas maiores classes de diâmetro (ver item 4.1).

As idades de 4,5 e 5,5 anos, apresentaram variação do diâmetro médio na ordem de 12%, entre as posições de varredura, contudo na idade de 5,5 anos a amplitude entre os diâmetros mínimos e máximos foi de até 2,7 cm (varredura referência). A maior variação entre os diâmetros mínimos e máximos nestas idades pode ser explicada pela forma da seção transversal que se aproxima de uma elipse, sendo assim, o algoritmo por calcular a distância máxima entre os pontos tende a superestimar os diâmetros.

A maior precisão na determinação do diâmetro, em relação a diversas pesquisas (MOSKAL e ZHENG, 2012) e (THIES e SPIECKER, 2004) em florestas boreais e temperadas, dá-se pelo fato do tronco de *Eucalyptus* spp. ter a forma circular. Vale ressaltar, que há uma grande diversidade de espécies florestais, e que a comparação com florestas plantadas é dificultada por se tratar de um estudo piloto com este tema.

Como nas unidades amostrais de 300 m² as de 400 m², a variação foi maior para varredura simples (FIGURA 33), porém os diâmetros médios se mantêm constantes. Os resultados demonstram que nas idades de 5,5 anos ocorrem maiores variações entre os diâmetros mínimos e máximos para os diferentes arranjos de varreduras em comparação com as idades de 2 e 4,5 anos.

As idades de 2, 4,5 e 5,5 anos, em unidades amostrais de 400 m² (FIGURA 33), apresentaram erros próximos as de 200 e 300 m².

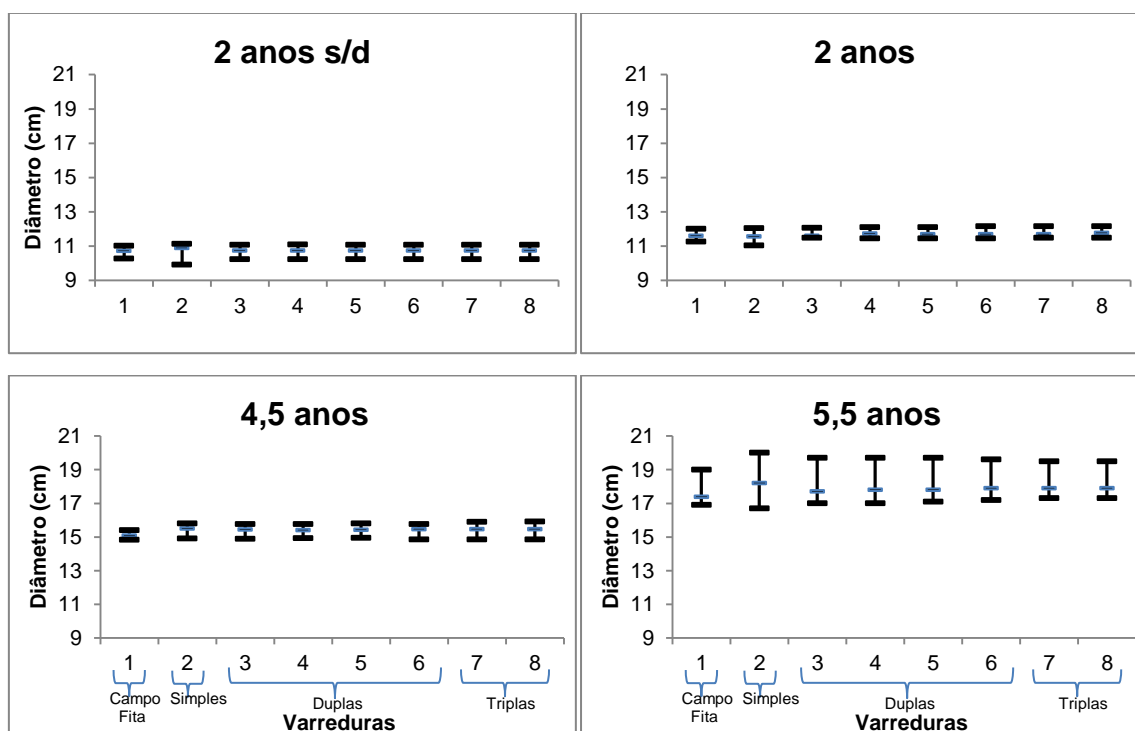


FIGURA 33 - DIÂMETROS MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS POR IDADE, EM UNIDADES AMOSTRAIS DE 400 m². CAMPO (1), SIMPLES (2), OPOSTAS (3), PARALELAS (4), PERPENDICULARES (5), REFERÊNCIA E EXTERNA (6), REFERÊNCIA E PERPENDICULARES (7) E REFERÊNCIA E OPOSTAS (8).

FONTE: O Autor (2015).

Nas idades de 2 s/d, 2, 4,5 e 5,5 anos, a determinação do diâmetro médio foi preciso para todas as posições de varredura (FIGURA 33), porém na idade de 5,5 anos apresentou variação de 3,3 cm para varredura simples. De forma geral, nota-se que as amplitudes dos diâmetros foram maiores nas unidades amostrais de 400 m², em relação os tamanhos de 200 e 300 m², devido ao maior número de árvores.

Para Bienert *et al.* (2006a), o erro médio na determinação do diâmetro pelo algoritmo de ajuste da circunferência, foi de 1,5 cm em relação às medições convencionais, acarretando em erro maior ao encontrado nesta pesquisa, o qual foi da ordem de 0,42 cm. Porém, os erros médios em relação à suta variaram entre +0,93 cm e -0,96 cm (BIENERT *et al.* 2006b).

Os diâmetros em cada idade foram agrupados e os erros foram determinados para os três tamanhos de unidades amostrais. Os resultados em todas as idades e combinações de varredura, simples, duplas e triplas, apresentaram uma distribuição dos erros muito semelhante variando da ordem de -15% a +19% para varreduras simples e -11% a +17% para varreduras múltiplas. Desta forma, serão apresentados os erros apenas para três arranjos de varredura (FIGURA 34) “referência”, “referência e externa” e “referência e opostas” para unidades amostrais de 400 m², representando as demais combinações.

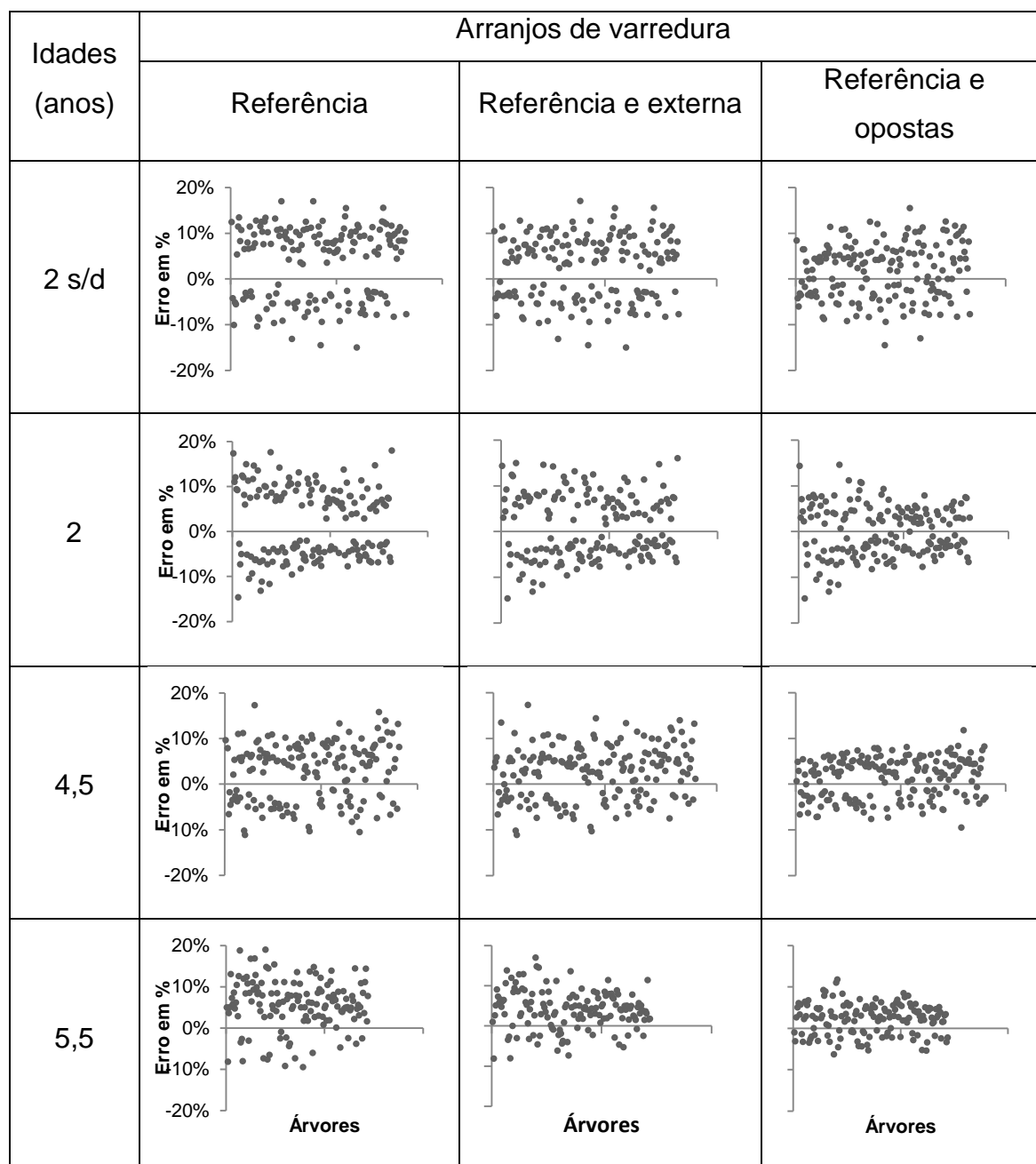


FIGURA 34 - DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DE ERROS NA IDADE DE 5,5 ANOS EM UNIDES AMOSTRAIS DE 400 m² PARA OS ARRANJOS DE VARREDURA “REFERÊNCIA”, “REFERÊNCIA E EXTERNA” E “REFERÊNCIA E OPOSTAS”.

A varredura simples (FIGURA 34) apresentou distribuição de erros mais dispersa do que para os arranjos de varreduras múltiplas em todas as idades. Nota-se também, que há maior número de pontos acima do eixo X, apresentando tendências de superestimativa no cálculo dos diâmetros para ambas as posições de varredura. Assim, a varredura tripla “referência e opostas” é a mais indicada para a determinação do diâmetro utilizando o algoritmo de distância máxima.

Para as unidades amostrais de 200 m², há o decréscimo do número de árvores na ordem de 41,5% em relação às unidades amostrais de 400 m², porém apesar de diminuir o número de árvores, a distribuição dos erros apresenta comportamento semelhante para 400 m² (TABELA 10), para as varreduras simples, duplas e triplas.

Desta forma, podemos afirmar que os resultados obtidos, para o conjunto de árvores de *Eucalyptus* spp analisadas, são de elevada confiabilidade para varreduras duplas e triplas. No entanto, dadas às condições florestais diferenciadas e a alta variação dos diâmetros, a adoção de no mínimo dois posicionamentos do equipamento é necessária para o levantamento dos dados de campo para obtenção do número de árvores (100%) e variáveis dendrométricas.

De acordo com esta pesquisa, apesar do resultado na determinação do diâmetro, ser igual estatisticamente para todas as combinações de varredura, considera-se que o levantamento de dados *laser* em unidades amostrais de 400 m², utilizando a varredura dupla “referência e externa”, é a mais indicada para a determinação de diâmetros em todas as idades, pois diminuem assim o tempo de coleta de dados em campo, principalmente considerando levantamentos em grande escala.

O terreno relativamente plano, o número de varreduras, o espaçamento amplo do plantio de 2,2 m x 3,6 m e o alinhamento do plantio, apresentaram influência positiva na qualidade dos resultados. O relevo acidentado tem forte influência na determinação dos diâmetros, devido à visada do equipamento, sendo que em varreduras simples os erros foram na ordem de até 35% e em varreduras múltiplas o erro foi reduzido para 15% muito similar ao encontrado nesta pesquisa (PUESCHEL *et al.* 2013).

4.5.2 Análise estatística

A análise estatística foi realizada a partir da análise de variância considerando o tamanho das unidades amostrais, as varreduras simples, duplas e triplas, e assim como a interação entre elas (TABELA 10). Aplicando o teste de *Bartlett*

separadamente para todas as idades, observou-se que as variâncias foram homogêneas ao nível de 95%.

Como se trata de um arranjo fatorial foi verificada a existência de diferenças estatísticas entre os três tamanhos de unidades amostrais, entre os arranjos de varredura e por fim da existência de interações significativas entre estes dois fatores.

O p valor para a interação, tamanho das unidades amostrais confrontando com as varreduras simples, duplas e triplas, foi maior para a idade de 5,5 anos, em comparação com as demais idades, ou seja, por apresentar as menores diferenças estatísticas, os resultados obtidos pelo algoritmo são mais próximos da realidade de campo.

TABELA 10 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA REFERENTE AO TAMANHO DAS UNIDADES AMOSTRAIS E COMBINAÇÃO DE VARREDURAS.

	Fatores	SQ	GL	QM	F	p -valor
2 anos s/d	Tamanho das u.a.	0,704	2	0,35246	1,69	0,1923
	Varreduras	2,718	7	0,38841	1,86	0,0891
	INTERAÇÕES					
	Tamanho x Varreduras	2,439	14	0,17426	0,83	0,6306
	RESÍDUO	15,041	72	0,20891		
2 anos	Fatores	SQ	GL	QM	F	p-valor
	Tamanho das u.a.	2,6700	2	1,3350	6,25	0,0531
	Varreduras	0,2777	7	0,03968	0,19	0,9875
	INTERAÇÕES					
	Tamanho x Varreduras	1,8138	14	0,12956	0,61	0,8511
4,5 anos	Fatores	SQ	GL	QM	F	p-valor
	Tamanho das u.a.	0,8564	2	0,42821	4,82	0,0508
	Varreduras	0,7728	7	0,11041	1,24	0,2906
	INTERAÇÕES					
	Tamanho x Varreduras	0,3785	14	0,02703	0,3	0,9918
5,5 anos	Fatores	SQ	GL	QM	F	p-valor
	Tamanho das u.a.	0,3425	2	0,17129	0,15	0,8577
	Varreduras	1,0473	7	0,14961	0,13	0,9937
	INTERAÇÕES					
	Tamanho x Varreduras	0,2854	14	0,02039	0,02	0,9942
	RESÍDUO	80,148	72	1,11317		

No caso das unidades amostrais obtidas para a idade de 2 anos s/d e 2 anos o p valor não foi significativo ao nível de 5% de probabilidade. Portanto, à medida que aumenta a idade, a interação entre o tamanho e as varreduras, o p valor aumenta e consequentemente aumenta a igualdade entre os tratamentos, sendo assim, apresentando maior correlação nas idades de 4,5 e 5,5 anos.

Em contrapartida, os resultados encontrados nesta pesquisa, SILVA (2011) comentam que o método de distância máxima apresentou resultados de superestimativa para *Pinus* spp, para as árvores com DAP em média de 17 cm. No entanto, para as árvores de menores diâmetros resultaram valores de médias iguais para um nível de significância de 5%. Desta forma, as características de circularidade do tronco de *Eucalyptus* spp, fizeram com que atenuasse a tendência do algoritmo de distância máxima em superestimar os diâmetros.

A análise estatística apresentou que para todas as idades não houve diferença estatística, conforme o nível de significância de 5%, sendo assim aceita-se a hipótese de que não existe diferença significativa entre os tratamentos, ou seja, entre o tamanho das unidades amostrais e as combinações de varredura para a determinação do diâmetro médio.

5. CONCLUSÕES

O alinhamento das árvores, por serem regulares somente na entre linha de plantio, influenciou positivamente na detecção automática com o uso de varredura simples, porém o efeito de sombreamento é maior à medida que aumenta o tamanho da unidade amostral.

O algoritmo de detecção automática foi eficaz na detecção das árvores para varreduras simples e múltiplas, contudo é necessário configurar o tamanho da malha 2D em relação à menor distância entre árvores, para não ocorrer subestimativas.

A adoção de varreduras simples deve ser aplicada somente em unidades amostrais circulares de até 300 m² para a idade de 2 anos s/d onde foram detectadas 100% das árvores.

As varreduras duplas “referência e externa” e “perpendiculares” são eficazes na detecção de 100% das árvores até a idade de 4,5 anos, em unidades amostrais de 200, 300 e 400 m². Para a idade de 5,5 anos são necessários três posicionamentos do equipamento devido à ocorrência de maiores diâmetros nesta idade, causando maior sombreamento, sendo que os melhores resultados observados foram com a configuração de varredura “referência e opostas”.

O uso de varredura simples para determinação do diâmetro não é indicado, pois acarreta em erros na ordem de 19%. As varreduras duplas e triplas, demonstraram ser de alta qualidade, apresentando igualdade estatística ao nível de 95% de probabilidade para a obtenção do diâmetro, independentemente do tamanho da unidade amostral. A varredura dupla “referência e externa”, e triplas “referência e perpendiculares” e “referência e opostas”, apresentaram resultados mais precisos, porém deve-se considerar dois posicionamentos, diminuindo assim o tempo de coleta de dados em campo.

6. RECOMENDAÇÕES

Para o registro das nuvens de pontos recomenda-se a instalação de alvos distribuídos com maiores diferenças de altura, para verificar se diminui o erro de junção das varreduras acima de 12 metros.

Recomenda-se testar o método de *Strand* (amostragem em linhas) com varreduras simples, para verificar o efeito de sombreamento das árvores, e até que distância do equipamento pode-se determinar o diâmetro com precisão.

Testar resoluções de varredura (densidade de pontos da nuvem) inferiores ao usado nesta pesquisa (1 ponto a cada 6 mm, a uma distância de 10 m do equipamento), para verificar se é possível determinar o diâmetro com acurácia, e detectar 100% das árvores, acarretando em menor tempo de coleta e menor volume de dados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASCHOFF, T.; SPIECKER, H. Algorithms for the automatic detection of trees in *laser scanner* data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36 – 8/w2.Freiburg, 2004.

ASCHOFF, T.; THIES, M.; SPIECKER, H. Describing forest stands using terrestrial *laser-scanning*. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences** v. 35, comm. 5, p. 237- 241, 2004.

BIENERT, A.; HESS, C.; MAAS, H. G.; VON OHEIMB, G. A voxel-based technique to estimate the volume of trees from terrestrial laser scanner data. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 5, p. 101-106, 2014.

BIENERT, A.; SCHELLER, S.; KEANE, E.; MOHAN, F.; NUGENT, C. Tree detection and diameter estimations by analysis of Forest terrestrial *laser scanner* point clouds. **ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007**.Finland, 2007.

BIENERT, A.; SCHELLER, S.; KEANE, E.; MULLOOLY, G.; MOHAN, F. Application of terrestrial *laser scanners* for the determination of forest inventory parameters. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 36. 2006a.

BIENERT, A.; MAAS, H. G.; SCHELLER, S. Analysis of the information content of terrestrial *laser scanner* point clouds for the automatic determination of forest inventory parameters. In: **Workshop on 3D Remote Sensing in Forest**, 14-15. Vienna, 2006b.

BIENERT, A.; MAAS, H. G. Methods for the automatic geometric registration of terrestrial laser scanner point clouds in forest stands. **International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences**, v. 38, n. part 3, p. W8, 2009.

BROLLY, G.; KIRALY, G. Algorithms for stem mapping by means of terrestrial laser scanning. **Acta Silvatica et Lignaria Hungarica**, 5, 119-130, 2010.

BUCK, A. L. B. **Análise de métodos de filtragem em dados *laser scanner* terrestre aplicados à modelagem tridimensional do tronco de *Pinus spp.*** 2012. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Departamento de Ciências Florestais, UFPR, Curitiba, 2012.

BUCK, A. L. B.; SILVA, M. N.; LINGNAU, C.; MACHADO, Á. M. L.; NETO, R. P. M.; PESCK, V. A. Avaliação da modelagem tridimensional do tronco de *Pinus elliottii* a partir de dados *LASER* terrestre. **Ambiência**. v. 8, p. 549-557, 2012.

BUCKSCH, A.; LINDENBERGH, R. C.; MENENTI, M. SkelTre—robusts keleton extraction from imperfect point clouds. **Vis Comput** 26:1283–1300, 2010.

CIFUENTES, R.; VAN DER ZANDE, D.; FARIFTEH, J.; SALAS, C.; COPPIN, P. Effects of voxel size and sampling setup on the estimation of forest canopy gap fraction from terrestrial *laser* scanning data. **Agricultural and Forest Meteorology** **194** (2014) 230–240, 2014.

CLARK, M. L.; ROBERTS, D. A.; EWEL, J. J.; CLARK, D. B. Estimation of tropical rain forest above ground biomass with small-footprint lidar and hyperspectral sensors. **Remote Sensing of Environment**, 115, 2931–2942, 2011.

CÔTÉ, J. F.; FOURNIER, R. A.; EGLI, R. An architectural model of trees to estimate forest structural attributes using terrestrial LiDAR. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 6, p. 761–777, 2011.

DASSOT, M.; COLIN, A.; SANTENOISE, P.; FOURNIER, M.; CONSTANT, T. Terrestrial *laser* scanning for measuring the solid wood volume, including branches, of adult standing trees in the forest environment. **Computers and Electronics in Agriculture** 89, 86–93, 2012.

DASSOT, M.; CONSTANT, T.; FOURNIER, M. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. **Ann For Sci** **68**: 959–974, 2011.

DUBAYAH, R. O.; SHELDON, S. L.; CLARK, D. B.; HOFTON, M. A.; BLAIR, J. B.; HURTT, G. C.; CHAZDON, R. L. Estimation of tropical forest height and biomass dynamics using lidar remote sensing at La Selva, Costa Rica. **Journal of Geophysical Research –Biogeosciences**, 115(G2), 17 pp.2010.

FASSNACHT F. E.; HARTIG F.; LATIFI H.; BERGER C.; HERNÁNDEZ, J., CORVALÁN P.; KOCH, B. Importance of sample size, data type and prediction method for remote sensing-based estimations of aboveground forest biomass. **Remote Sensing of Environment**, 154, 102–114.

FASSI, F.; ACHILLE, C.; GAUDIO, F.; FREGONESE, L. Integrated Strategies for the Modeling Of Very Large, Complex Architecture. **Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci**, v. 38, n. 5, p. W16, 2011.

FLECK, S.; MÖLDER, I.; JACOB, M.; GEBAUER, T.; JUNGKUNST, H. F.; LEUSCHNER, C. Comparison of conventional eight-point crown projection with LiDAR-based virtual crown projections in a temperate old growth forest. **Ann For Sci** 68:1173–1185, 2011.

FORSMAN, P.; HALME, A. 3-D mapping of natural environments with trees by means of mobile perception. **IEEE Transactions on Robotics** 21 (3), 482–490, 2005.

HENNING J. G. e RADTKE P. J. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. **Forest Sci.**, vol. 52, no. 1, pp. 67–80, 2006.

- HOPKINSON, C.; CHASMER, L.; YOUNG-POW, C.; TREITZ, P. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. **Canadian Journal of Forest Research** 34 (3), 573–583, 2004.
- HUANG, H.; LI, Z.; GONG, P.; CHENG, X.; CLINTON, N.; CAO, C.; WANG, L. Automated methods for measuring dbh and tree heights with commercial scanning Lidar. **Photogram. Eng. Remote Sens.**, vol. 77, n. 3, pp. 219–227, 2011.
- HUANG, P.; PRETZSCH, H. Using terrestrial laser scanner for estimating leaf areas of individual trees in a conifer forest. **Trees**, v. 24, n. 4, p. 609-619, 2010.
- HUDAK, A. T.; STRAND, E. K.; VIERLING, L. A.; BYRNE, J. C.; EITEL, J. U.; MARTINUZZI, S.; FALKOWSKI, M. J. Quantifying aboveground forest carbon pools and fluxes from repeat LiDAR surveys. **Remote Sensing of Environment**, 123, 25–40, 2012.
- HUSCH, B. **Planning a forest inventory**. Roma, FAO, 1971, 120 p.
- JUNG, S. E.; KWAK, D. A.; PARK, T.; LEE, W. K.; YOO, S. Estimating crown variables of individual trees using airborne and terrestrial *laser* scanners. **Remote Sens3**: 2346–2363, 2011.
- KANKARE, V.; HOLOPAINEN, M.; VASTARANTA, M.; PUTTONEN, E.; YU, X.; HYYPPÄ, J.; ALHO, P. Individual tree biomass estimation using terrestrial *laser* scanning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 75, 64–75, 2013.
- KIRÁLY, G.; BROLLY, G. Modelling single trees from terrestrial laser scanning data in a forest reserve. **The Photogrammetric Journal of Finland**, v. 21, n. 1, p. 37-50, 2008.
- LAURIN, G. V.; CHEN, Q.; LINDSELL, J. A.; COOMES, D. A.; DEL FRATE, F.; GUERRIERO, L.; VALENTINI, R. Above ground biomass estimation in an African tropical forest with lidar and hyperspectral data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 89, 49–58, 2014.
- LEITE H.G.; NOGUEIRA G.S.; CAMPOS J.C.C.; SOUZA A.L.; CARVALHO A. Avaliação de um modelo de distribuição diamétrica ajustado para povoamentos de *Eucalyptus* spp submetidos a desbaste. *Revista Árvore* 29: 271–280, 2005.
- LEITE, H. G. & OLIVEIRA, F. H. T. Statistical procedure to test the identity of analytical methods. **Comm. in Soil Science & Plant Anal**, V. 33 n. 7, 2002.
- LI, Y.; HESS, C.; VON WEHRDEN, H.; HÄRDTLE, W.; VON OHEIMB, G. Assessing tree dendrometrics in young regenerating plantations using terrestrial *laser* scanning. **Annals of Forest Science**, 2014.
- LIANG, X.; KANKARE, V.; YU, X.; HYYPPA, J.; HOLOPAINEN, M. Automated stem curve measurement using terrestrial laser scanning. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, 52(3), 1739-1748, 2014.

LIANG X. e HYYPPÄ J. Automatic stem mapping by merging several terrestrial *laser* scans at the feature and decision levels,” **Sensors**, vol. 13, n. 2, pp. 1614–1634, Jan. 2013.

LIANG, X.; LITKEY, P.; HYYPPÄ, J.; KAARTINEN, H.; VASTARANTA, M.; E HOLOPAINEN, M. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial *laser* scanning. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** 50 (2), 661–670, 2012.

LIANG, X.; LITKEY, P.; HYYPPÄ, J.; KAARTINEN, H.; VASTARANTA, M.; E HOLOPAINEN, M. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial *laser* scanning. **IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing**, In Press, 2011.

LIANG, X.; LITKEY, P.; HYYPPÄ, J.; KUKKO, A.; KAARTINEN, H.; HOLOPAINEN, M. Plot-level trunk detection and reconstruction using one scan mode terrestrial *laserscanning* data. In: international Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications, 2008, Beijing, 2008.

LICHTI, D. D.; GORDON, S. J.; STEWART, M. P. Ground-based *laser* scanners: operation, systems and applications. **Geophys J Roy Astron Soc** 56: 21–33, 2002.

LINGNAU, C.; MACHADO, A. M. L.; BAVARESCO JUNIOR, A.; COLLA, F. L. Determinação de diâmetros em diferentes alturas de árvores individuais a partir de dados *laser* terrestre. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...Natal: INPE** 2009. p. 5031 – 5038.

LINGNAU, C.; NAKAJIMA, N. Y.; DAMAS, B.; SANTOS, D. S. DOS; VINHAL, L. A. Obtenção de parâmetros florestais através de *laser* terrestre – Novas perspectivas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. 2007, Florianópolis. **Anais... Florianópolis: INPE**, 2007.

LITKEY, P.; LIANG, X.; KAARTINEN, H.; HYYPPÄ, J.; KUKKO, A.; HOLOPAINEN, M. Single-scan TLS methods for forest parameter retrieval, in: **SilviLaser** 2008. pp. 295–304.

LOVELL, J. L.; JUPP, D. L. B.; NEWNHAM, G. J.; CULVENOR, D. S. Measuring tree stem diameters using intensity profiles from ground-based scanning lidar from a fixed viewpoint. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 1, p. 46-55, 2011.

LOVELL, J. L.; JUPP, D. L.; CULVENOR, D. S.; COOPS, N. C. Using airborne and ground-based ranging lidar to measure canopy structure in Australian forests. **Canadian Journal of Remote Sensing** 29, 607–622, 2011.

MAAS, H. G.; BIENERT, A.; SCHELLER, S.; KEANE, E. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial *laser* scanner data. **International Journal of Remote Sensing** 29, 1579–1593, 2008.

MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO FILHO, A. Dendrometria. 2. ed. Guarapuava: UNICENTRO, 2006.

MARTINS NETO, R. P. M.; BUCK, A. L. B.; SILVA, M. N.; LINGNAU, C.; MACHADO, Á. M. L.; PESCK, V. A. Avaliação da varredura *laser* terrestre em diferentes distâncias da árvore para mensurar variáveis dendrométricas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, n° 3, p. 420 – 433, jul – set, 2013.

MARTINS NETO, R. P.; BUCK, A. L. B.; SILVA, M. N.; LINGNAU, C.; MACHADO, Á. M. L.; PESCK, V. A.. Modelagem da seção transversal de *Pinus taeda* L. por meio da varredura *laser* terrestre. In: Seminário de atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas aplicados à Engenharia Florestal, Curitiba. **Anais...**2012 p. 776-783.

MOSKAL M.; ZHENG G. Retrieving forest inventory variables with terrestrial *laser* scanning(TLS) in urban heterogeneous forest. **Remote Sensing** 4: 1-20, 2012.

MOSKAL, L. M.; ZHENG, G. Retrieving forest inventory variables with terrestrial laser scanning (TLS) in urban heterogeneous forest. **Remote Sensing**, v. 4, n. 1, p. 1-20, 2011.

MURPHY, G. E.; ACUNA, M. A.; DUMBRELL, I. Tree value and log product yield determination in radiata pine (*Pinus radiata*) plantations in Australia: comparisons of terrestrial laser scanning with a forest inventory system and manual measurements. **Canadian Journal of Forest Research** 40, 2223–2233, 2010.

NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T.; BOLLANDSÅS, O. M.; GREGOIRE, T. G.; NELSON, R.; STÅHL, G. Comparison of precision of biomass estimates in regional field sample surveys and airborne LiDAR-assisted surveys in Hedmark County, Norway. **Remote Sensing of Environment**, 130(15), 108–120, 2013.

NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T. Estimating growth using canopy metrics derived from airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment** 96 (3–4), 453–465, 2005.

OTHMANI, A.; PIBOULE, A.; KREBS, M.; STOLZ, C.; VOON, L. L. Y. Towards automated and operational forest inventories with T-Lidar. In: **Proceedings of the SilviLaser Conference 2011**. Hobart (Australia) 16-19.

PFEIFER, N.; GORTE, B.; WINTERHALDER, D. Automatic reconstruction of single trees from terrestrial *laser scanner* data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)**, v. 35, n. 5, part b, p. 114 – 119, 2004.

PUESCHEL, P.; NEWNHAM, G.; ROCK, G.; UDELHOVEN, T.; WERNER, W.; HILL, J. The influence of scan mode and circle fitting on tree stem detection, stem diameter and volume extraction from terrestrial *laser* scans. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 77, 44–56, 2013.

SCHILLING, A.; SCHMIDT, A.; MAAS, H. G. Tree topology representation from TLS point clouds using depth-first search in voxel space. **Photogram Eng. Remote Sens.** **78**:383–392, 2012.

SEIDEL D, AMMER C. Efficient measurements of basal area in short rotation forests based on terrestrial *laserscanning* under special consideration of shadowing. **iForest** **7**: 227-232, 2014.

SEIDEL, D.; ALBERT, K.; FEHRMANN, L.; AMMER, C. The potential of terrestrial *laser scanning* for the estimation of understory biomass in coppice-with-standard systems. **Biomass and Bioenergy** **47**: 20-25, 2012.

SILVA, M.N. **Aplicação de laser scanner terrestre para determinação de variáveis dendrométricas em *Pinus spp.*** 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Departamento de Ciências Florestais, UFPR, Curitiba, 2011.

SILVA, M. N.; BUCK, A. L. B.; LINGNAU, C.; MACHADO, Á. M. L.; NETO, R. P. M.; PESCK, V. A. Laser Scanner Terrestre para medições florestais - Princípios e Aplicações. **RBC. Revista Brasileira de Cartografia (Online)**, v. 65, p. 1143-1152, 2013.

SIMONSE, M.; ASCHOFF, T.; SPIECKER, H.; THIES, M. Automatic Determination of Forest Inventory Parameters Using Terrestrial *Laser scanning*. **Proceedings of the Scand Laser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests**, Umea/Sweden. p. 251- 257, 2003.

SRINIVASAN, S.; POPESCU, S. C.; ERIKSSON, M.; SHERIDAN, R. D.; Ku, N. W. Terrestrial Laser Scanning as an Effective Tool to Retrieve Tree Level Height, Crown Width, and Stem Diameter. **Remote Sensing**, v. 7, n. 2, p. 1877-1896, 2015.

STRAHLER, A. H.; JUPP, D. L.; WOODCOCK, C. E.; SCHAAF, C. B.; YAO, T., ZHAO, F.; BOYKIN-MORRIS, W. Retrieval of forest structural parameters using a ground-based lidar instrument (Echidna®). **Canadian Journal of Remote Sensing** **34**, 426–440, 2008.

TANSEY, K.; SELMES, N.; ANSTEE, A.; TATE, N. J.; DENNISS, A. Estimating tree and stand variables in a Corsican Pine woodland from terrestrial *laser scanner* data. **International Journal of Remote Sensing** **30**, 5195–5209, 2009.

THIES, M.; SPIECKER, H. Evaluation and future prospects of terrestrial *laser scanning* for standardized forest inventories. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXVI – 8/w2.Freiburg, 2004.

TRIMBLE NAVAGATION LIMITED. User guide trimble tx5. 2013. Disponível em <http://www.trimble.com/3d-laser-scanning/tx5.aspx>. Acesso em 12/07/2015.

TROCHTA, J.; KRÁL, K.; JANÍK, D.; ADAM, D. Arrangement of terrestrial laser scanner positions for area-wide stem mapping of natural forests. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 43, n. 999, p. 355-363, 2013.

WATT, P.J.; DONOGHUE, D.N.M. Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. **International Journal of Remote Sensing** 26, 1437–1446, 2005.

WEŻYK, P.; SZOSTAK, M.; TOMPALSKI, P. Biomass and volume profile of the scots pine (*pinus sylvestris* L.) In the niepolomice forest based on terrestrial laser scanning data—a case study. **Roczniki Geomatyki**, v. 10, n. 5, p. 79--89, 2012.

WEZYK, P.; KOZIOL, K.; GLISTA, M.; PIERZCHALSKI, M. Terrestrial laser scanning versus traditional forest inventory first results from the polish forests. **ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007**, p. 424 -429. Finland, 2007.

YAO, T.; YANG, X.; ZHAO, F.; WANG, Z.; ZHANG, Q.; JUPP, D.; STRAHLER, A. Measuring forest structure and biomass in New England forest stands using Echidna ground-based lidar. **Remote Sens. Environ.**, 115 (2011), pp. 2965–2974, 2011.
ZASADA, M.; STEREŃCZAK, K.; DUDEK, W. M.; RYBSKI, A. Horizon visibility and accuracy of stocking determination on circular sample plots using automated remote measurement techniques. **Forest Ecology and Management** 302, 171 177, 2013.

ZHAO, F.; YANG, X.; SCHULL, M. A.; ROMÁN-COLÓN, M. O.; YAO, T.; WANG, Z.; STRAHLER, A. H. Measuring effective leaf area index, foliage profile, and stand height in New England forest stands using a full-waveform ground-based lidar. **Remote Sens. Environ.**, 115 (2011), pp. 2954–2964, 2011.

VASTARANTA, M.; MELKAS, T.; HOLOPAINEN, M.; KAARTINEN, H.; HYYPPÄ, J., HYYPPÄ, H. Laser-based field measurements in tree-level forest data acquisition, **Photogram. J. Finland**, vol. 21, n°. 2, pp. 51–61, Feb. 2009.

8. APÊNDICES

Apêndice 1

```

Algoritmo de detecção de árvores.
/*
 * To change this template, choose Tools | Templates
 * and open the template in the editor.
 */
package org.ufpr.lst;

import java.io.BufferedReader;
import java.io.BufferedWriter;
import java.io.FileNotFoundException;
import java.io.FileReader;
import java.io.FileWriter;
import java.io.IOException;
import java.util.ArrayList;
import java.util.LinkedList;
import java.util.List;

/**
 *
 * @author Vagner Alex Pesck
 */
public class IdentificacaoAutomaticaDeArvores {
    public final static String nomeArquivoEntrada =
"C:\\Users\\Rafael\\Documents\\ufpr\\Projeto\\TLS\\DadosTeste\\Parcela
14\\Parcela14.pts";
    public final static String nomeArquivoSaida =
"C:\\Users\\Rafael\\Documents\\ufpr\\Projeto\\TLS\\DadosTeste\\Parcela
14\\IdentificacaoAutomatizada.csv";
    public final static double raioDaParcela = 11.28;
    public final static double maxZ = - 0.35;
    public final static double minZ = -0.25;
    public final static double proximidadePontos = 1.5;

    public static void main(String args[]) throws FileNotFoundException,
IOException{
        //Filtro para parcela e fatia.
        System.out.println("---Filtrando parcela e fatia...");
        NuvemDePontos nuvem =
        filtraPontosParcelaEFatia(nomeArquivoEntrada, raioDaParcela, minZ, maxZ);
        System.out.println("---Fim filtragem parcela e fatia.");
        //Separa os pontos filtrados por árvore. Determinado pela proximidade
        entre os pontos.
        //Separa os pontos por grupos cuja distância seja igual ou inferior ao
        valor passado

```

```

        System.out.println("---Identificando as arvores...");
        List<NuvemDePontos>listaArvores
        filtraListaArvores(nuvem.getListaPontos(),proximidadePontos);
        System.out.println("---Fim identificacaoautomatica de arvores.");
        //Escreve no arquivo de saída
        System.out.println("---Escrevendo      resultado      no      arquivo
"+nomeArquivoSaida+".");
        escreveArquivoSaida(listaArvores,nomeArquivoSaida);
        System.out.println("---Fim processamento.");
    }
    publicstaticvoidescreveArquivoSaida(List<NuvemDePontos>listaArvores,
StringnomeDoArquivo) throwsFileNotFoundException, IOException{
        BufferedWriterbw = new BufferedWriter(new FileWriter(nomeDoArquivo));
        intnumArvore=0;
        System.out.println("Numero de Arvores="+listaArvores.size());
        for(NuvemDePontosarvore:listaArvores){
            numArvore++;
            for(Ponto3D ponto: arvore.getListaPontos()){
                String linha = ponto.getX()+";"+ponto.getY()+";"+ponto.getZ()+";"+numArvore +
"\n";
                linha = linha.replace(".", ",");
                bw.write(linha);

//System.out.println(ponto.getX()+"\t"+ponto.getY()+"\t"+ponto.getZ()+"\t"+numArvore
);
            }
        }
        bw.close();

```

Apêndice 2

RESULTADO DA OPERAÇÃO DE REGISTRO DAS 16 UNIDADES AMOSTRAIS MOSTRANDO OS VALORES DE ERROS EM GRAUS.

Idade (anos)	Unidade Amostrai	tensão media (°)	Tensão max (°)	Desvio (°)
2 s/d	1	0,0051	0,0124	0,0039
	2	0,0034	0,0081	0,0022
	3	0,0047	0,0130	0,0036
	4	0,0032	0,0089	0,0022
2	5	0,0048	0,0139	0,0042
	6	0,0051	0,0153	0,0049
	7	0,0031	0,0086	0,0022
	8	0,0034	0,0095	0,0026
4,5	9	0,0077	0,0266	0,0079
	10	0,0043	0,0150	0,0035
	11	0,0044	0,0148	0,0034
	12	0,0040	0,0100	0,0027
5,5	13	0,0034	0,0111	0,0027
	14	0,0058	0,0118	0,0049
	15	0,0059	0,0203	0,0041
	16	0,0056	0,0167	0,0040

Apêndice 3

DIÂMETROS MÉDIOS OBTIDOS PELO ALGORITMO DE DISTÂNCIA MÁXIMA NAS DIFERENTES IDADES.

2 anos s/d			
	Unidades amostrais (m²)		
Combinações	200	300	400
Campo	10,60	10,65	10,58
Simples	10,08	10,64	10,66
Opostas	10,34	10,60	10,53
Paralelas	10,43	9,80	10,53
Perpendiculares	10,13	10,16	10,50
Referência e externa	10,34	10,60	10,53
Referência e perpendiculares	10,56	11,04	10,51
Referência e opostas	10,34	10,60	10,53
2 anos c/d			
	Unidades Amostrais (m²)		
Combinações	200	300	400
Campo	11,53	11,54	11,60
Simples	12,09	11,43	11,55
Opostas	12,09	11,45	11,54
Paralelas	11,66	11,72	11,52
Perpendiculares	11,66	11,69	11,52
Referência e externa	12,09	11,39	11,61
Referência + perpendiculares	11,66	11,75	11,51
Referência + opostas	12,09	11,40	11,61
4,5 anos			
	Unidades Amostrais (m²)		
Combinações	200	300	400
Campo	15,05	15,06	15,08
Simples	15,46	15,35	15,12
Opostas	15,28	15,43	15,24
Paralelas	15,28	15,41	15,24
Perpendiculares	15,47	15,41	15,09
Referência + externa	15,26	15,43	15,10
Referência + perpendiculares	15,28	15,43	15,25
Referência + opostas	15,47	15,43	15,10
5,5 anos			
	Unidades Amostrais (m²)		
Combinações	200	300	400
Campo	17,34	17,36	17,39
Simples	17,51	17,56	17,63
Opostas	17,60	17,64	17,43
Paralelas	17,62	17,64	17,43
Perpendiculares	17,61	17,63	17,45
Referência + externa	17,60	17,65	17,42
Referência + perpendiculares	17,58	17,66	17,41
Referência + opostas	17,60	17,64	17,43